

Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós Graduação em Design

Gandhi Escajadillo Toledo

Parâmetros de Design para a Configuração de Dutos de Luz Solar

Curitiba
Novembro, 2013

Gandhi Escajadillo Toledo

Parâmetros de Design para a Configuração de Dutos de Luz Solar

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design, do Setor de Artes, Comunicação e Design da Universidade Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieira Pelegrini

Curitiba

Novembro, 2013

Catálogo na publicação
Fernanda Emanóela Nogueira – CRB 9/1607
Biblioteca de Ciências Humanas e Educação - UFPR

Toledo, Gandhi Escajadillo
Parâmetros de design para a configuração de dutos de
luz solar / Gandhi Escajadillo Toledo – Curitiba, 2013.
148 f.

Orientador: Profº. Drº. Alexandre Vieira Pelegrini
Dissertação (Mestrado em Design) – Setor de Artes,
Comunicação e Design da Universidade Federal do Paraná.

1. Dutos de luz solar. 2. Design - Parâmetros. 3.
Sustentabilidade. 4. Iluminação natural. I. Título.

CDD 745.2

TERMO DE APROVAÇÃO

GANDHI ESCAJADILLO TOLEDO

"Parâmetros de Design para a Configuração de Dutos de Luz Solar"

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Design, área de concentração em Design Gráfico e de Produto, no Programa de Pós-Graduação em Design do Setor de Artes, Comunicação e Design da Universidade Federal do Paraná.

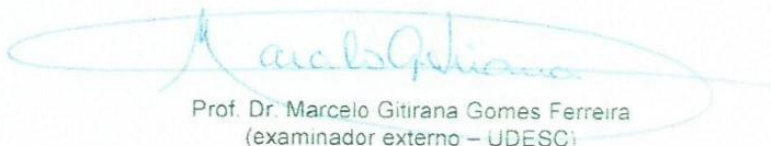
Curitiba, 27 de novembro de 2013.



Prof. Dr. Alexandre Vieira Pelegrini
(orientador e presidente da banca - UTFPR)



Prof. Dr. Adriano Heemann
(examinador interno - UFPR)



Prof. Dr. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira
(examinador externo - UDESC)

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Design, do Setor de Artes, Comunicação e Design, da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realizar o mestrado no Brasil.

À CAPES pelo financiamento fornecido através da Bolsa de Estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Vieira Pelegrini, pela confiança ao longo desta pesquisa.

Aos membros da banca, pelas contribuições e sugestões no trabalho.

Ao Prof. Dr. Cabús, pelo apoio recebido na primeira fase da pesquisa, e pelas importantes contribuições no presente trabalho.

Ao João Barba, pela amizade e apoio constante.

RESUMO

No contexto atual de aumento de consumo de energia, o desenvolvimento de tecnologias que contribuam na redução do consumo energético encontra-se em ascensão. Uma destas tecnologias que possibilitam a redução do consumo de energia elétrica associada à iluminação artificial e aumentam o conforto lumínico nos ambientes internos através da aplicação estratégica da luz solar, são os dutos de luz solar. Evidencia-se que apesar dos benefícios destes sistemas serem amplamente discutidos na literatura técnica internacional, no Brasil ainda são poucas as pesquisas que investigam os parâmetros de configuração e desempenho destas tecnologias dentro do contexto nacional. Neste panorama, o objetivo desta pesquisa é determinar os parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar, com foco de aplicação no setor residencial. Com base na análise dos parâmetros de configuração indicados na literatura, a abordagem desta pesquisa foi dividida em quatro fases principais: (1) condução de simulações computacionais através do emprego do software Tropix para avaliar o desempenho de dutos de luz solar; (2) fabricação de um protótipo de duto de luz solar; (3) instalação e avaliação lumínica pós-instalação do protótipo; (4) análise e interpretação dos resultados para definição dos parâmetros de configuração. A fase de simulação abrangeu duas sub-etapas: a comparação do desempenho de diferentes protótipos e a simulação do desempenho do modelo eleito em ambiente real de uso. A partir das diretrizes analisadas para a configuração dos componentes do sistema, na fase de simulações, foi configurado e instalado o protótipo. O protótipo com todas as variáveis e dispositivos de iluminação foram analisados na fase de pós-instalação; da mesma forma foi estimado o *payback* do sistema. O duto de luz acrescentou consideravelmente o nível de iluminação em todas as condições de céu, atingindo um incremento no nível de iluminação de até 150 % para o céu coberto; e o máximo percentual de aproveitamento de luz foi de até 50%, para o céu semicoberto. Os sistemas de controle e dispositivos propostos cumpriram com a função de melhorar o desempenho do protótipo, principalmente em condições de céu claro. Assim, foram propostas alternativas para melhorar o sistema de controle e redirecionamento de luz. O *payback* estimado, de aproximadamente 4 anos no contexto atual da pesquisa, é menor em comparação com os produtos que são atualmente importados. Este acontecimento evidencia que ao ser configuradas e testadas estas tecnologias no contexto brasileiro, pode-se reduzir o tempo de retorno de investimento. Esta pesquisa contribui para o campo do design através da identificação e especificação de parâmetros para a configuração de dutos de luz. A pesquisa também evidencia a importância dos dispositivos de controle e redirecionamento da luz captada pelo duto solar. Os parâmetros apresentados neste trabalho, podem ser utilizados por designers, arquitetos e especialistas de iluminação, como também, podem ser usados para o desenvolvimento e aperfeiçoamento destas tecnologias.

Palavras chave: Dutos de Luz Solar, parâmetros de design, sustentabilidade, iluminação natural

ABSTRACT

In the current background of increasing energy consumption, the development of technologies that contribute to reducing energy consumption is an asset. One technology that reduces electricity consumption associated with artificial lighting, and also increases lighting comfort in indoors environment through the strategic application of sunlight, are solar light pipes. It is evident that despite the benefits of these systems are widely discussed in international technical literature, in Brazil there are few studies that investigate the configuration parameters and performance of these technologies within the national context. In this setting, the aim of this study is to determine the design parameters for configuring solar light pipes, focused on applications in the residential sector. Based on the analysis of the configuration parameters researched in literature, the research approach was divided in four phases: (1) computer simulations using TropLux software to evaluate the performance of solar light pipes; (2) Prototype Configuration of solar light pipe; (3) Installation and post-installation lighting evaluation of the prototype system; (4) analysis and results interpretation to define the configuration parameters. The simulation phase comprised two stages: a performance comparison of different prototypes and performance simulation of the chosen model in real environment of use. Based on the results from the analyzed guidelines for the configuration of system components in simulations phase, the prototype was configured and installed. The prototype with all the variables and lighting devices was analyzed in the post –installation phase, and the payback system was estimated. The light pipe considerably increased lighting levels in all sky conditions, achieving a lighting increase level up to 150% for covered sky; and the maximum percentage of lighting utilization was up to 50%, for partially-covered sky. Lighting control systems and devices achieved the goal of improving the prototype performance, specifically in clear sky conditions. Alternatives to improve lighting control system were proposed. The estimated payback, approximately four years in the current context of the research, is lower compared to products that are currently imported. This suggests that if these technologies are configured and tested in the Brazilian context, the payback could be reduced. The contribution to the field research in design is through the identification and specification of parameters for the configuration of solar light pipes. The research highlights the importance of lighting control and light redirection devices. The parameters presented, could be used by designers, architects and lighting specialists. In addition, these parameters can be used for the development and further improvements of solar light pipes technologies.

Keywords: Solar light pipe, design parameters, sustainability, natural lighting.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASSIFICAÇÃO SOCIOECONÔMICA VERSUS FAIXA DE CONSUMO DE ENERGIA PARA A REGIÃO SUL DO BRASIL.	21
FIGURA 2. VISÃO GERAL DO MÉTODO DE PESQUISA.	24
FIGURA 3. FONTES DE LUZ NATURAL QUE ALCANÇAM O EDIFÍCIO.	26
FIGURA 4. DEFINIÇÃO DOS ÂNGULOS DE ALTITUDE E AZIMUTE DO SOL.	30
FIGURA 5. CÉU CLARO (1), CÉU PARCIALMENTE COBERTO (2), CÉU ENCOBERTO (3).	32
FIGURA 6. COMPONENTES DA LUZ NATURAL – LUZ SOLAR DIRETA, LUZ DO CÉU DIFUSA, LUZ REFLETIDA.	33
FIGURA 7. INTERAÇÃO DA LUZ COM AS SUPERFÍCIES.	35
FIGURA 8. PRINCÍPIO DE REFRAÇÃO.	35
FIGURA 9. DIFERENTES TIPOS DE ABERTURAS ZENITAIS HORIZONTAIS E VERTICAIS.	41
FIGURA 10. DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS AVANÇADOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.	42
FIGURA 11. COMPONENTES DOS TUBOS DE LUZ SOLAR.	43
FIGURA 12. SISTEMA HÍBRIDO DE TUBO SOLAR COM PAINEL FOTOVOLTAICO.	44
FIGURA 13. COMPARAÇÃO DA PORCENTAGEM DE ECONOMIA DE ENERGIA DE DIVERSOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL.	45
FIGURA 14. TUBOS DE LUZ INSTALADOS NO ESTÁDIO DA PREFEITURA DE VOLTA REDONDA.	52
FIGURA 15. FASES DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.	60
FIGURA 16. ETAPAS E COLETA DE DADOS ENVOLVIDOS NAS SIMULAÇÕES DA PRÉ-CONFIGURAÇÃO DO DUTO SOLAR.	61
FIGURA 17. TELA DO TRABALHO DO TROPLUX 6.	62
FIGURA 18. DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO NO SOFTWARE TROPLUX, PARA A COMPARAÇÃO DE MODELOS.	63
FIGURA 19. DADOS DE ENTRADA E DE SAÍDA UTILIZADOS PARA A SIMULAÇÃO NO SOFTWARE TROPLUX, EM AMBIENTE REAL DE USO.	64
FIGURA 20. ETAPAS E COLETA DE DADOS ENVOLVIDOS NA CONFIGURAÇÃO DO PRODUTO.	65
FIGURA 21. ETAPAS E COLETA DE DADOS ENVOLVIDOS NA AVALIAÇÃO PÓS-INSTALAÇÃO.	68
FIGURA 22. LUXÍMETRO LX1330B COM SMART SENSOR.	69
FIGURA 23. COLETA DE DADOS ENVOLVIDOS PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DESIGN PARA A CONFIGURAÇÃO DE DUTOS DE LUZ SOLAR.	72
FIGURA 24. DADOS DE ENTRADA QUE CORRESPONDEM AOS PARÂMETROS AMBIENTAIS.	74
FIGURA 25. DADOS DE ENTRADA QUE CORRESPONDEM AOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.	75
FIGURA 26. DIMENSÕES DO AMBIENTE UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES E UBIQUAÇÃO DO TUBO.	76
FIGURA 27. ESQUEMA DO AMBIENTE E PONTOS DE ANÁLISE PARA A SIMULAÇÃO.	77
FIGURA 28. TRÊS MODELOS SIMULADOS NO TROPLUX.	78
FIGURA 29. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS EQUINÓCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 5.	79
FIGURA 30. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS SOLSTÍCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 5.	80
FIGURA 31. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS EQUINÓCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 10.	81
FIGURA 32. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS SOLSTÍCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 10.	82
FIGURA 33. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS EQUINÓCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 15.	83
FIGURA 34. DISTRIBUIÇÃO DA LUZ NATURAL NOS SOLSTÍCIOS PARA OS TRÊS TUBOS EM CÉU TIPO 15.	84
FIGURA 35. DIMENSÕES DA SALA E ZONAS DE ANÁLISE.	86
FIGURA 36. VALORES DAS ILUMINÂNCIAS INTERNAS PARA OS EQUINÓCIOS NOS TRÊS TIPOS DE CÉU.	87
FIGURA 37. VALORES DAS ILUMINÂNCIAS INTERNAS PARA OS SOLSTÍCIOS NOS TRÊS TIPOS DE CÉU.	88

FIGURA 38. COMPONENTES DO TUBO DE LUZ SOLAR	91
FIGURA 39. PEÇAS DA BASE DO SISTEMA E COLETOR.....	92
FIGURA 40. DIMENSÕES GERAIS DO TUBO DE ALUMÍNIO	93
FIGURA 41. DOBRA DE CHAPAS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO. FONTE: A AUTORA.....	94
FIGURA 42. PEÇAS DA PARTE DO DIFUSOR DO TUBO SOLAR.....	95
FIGURA 43. TODAS AS PEÇAS DO SISTEMA DE CONTROLE DE LUZ.FONTE: A AUTORA.	96
FIGURA 44. PEÇAS PARA O FECHAMENTO DA ENTRADA DE LUZ.....	96
FIGURA 45. PEÇAS DO SISTEMA DE CONTROLE DE LUZ PARCIAL.....	97
FIGURA 46. DISPOSITIVO DE CONTROLE DE LUZ.	98
FIGURA 47. ETAPAS DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO – PASSO A PASSO – PARTE 1	99
FIGURA 48. ETAPAS DO PROCESSO DE INSTALAÇÃO – PASSO A PASSO – PARTE 2	100
FIGURA 49. PONTOS DE MEDIÇÕES NA SALA DE TESTE	102
FIGURA 50. MÉDIA DAS PORCENTAGENS DE ACRÉSCIMO PARA OS TRÊS TIPOS DE CÉU	105
FIGURA 51. ILUMINÂNCIAS PARA O PONTO 1 NO CÉU COBERTO.....	106
FIGURA 52. ILUMINÂNCIAS PARA O PONTO 1 NO CÉU ENCOBERTO.	107
FIGURA 53. ILUMINÂNCIAS PARA O PONTO 1 NO CÉU CLARO.	108
FIGURA 54. AMBIENTES DA CASA 1.0 COM A UBIQUAÇÃO DOS 3 PONTOS DE MEDIÇÕES PARA OS DISPOSITIVOS DE REDIRECIONAMENTO DE LUZ.....	109
FIGURA 55. ILUMINÂNCIAS COM OS DISPOSITIVOS DE REDIRECIONAMENTO DE LUZ PARA O CÉU COBERTO .	110
FIGURA 56. ILUMINÂNCIAS COM OS DISPOSITIVOS DE REDIRECIONAMENTO DE LUZ PARA O CÉU SEMICOBERTO	110
FIGURA 57.ILUMINÂNCIAS COM OS DISPOSITIVOS DE REDIRECIONAMENTO DE LUZ PARA O CÉU CLARO.	111
FIGURA 58. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO A PORCENTAGEM DE ACRÉSCIMO DO TUBO RETO EM COMPARAÇÃO COM O TUBO MENOS EFICIENTE PARA OS TRÊS TIPOS DE CÉU.....	118
FIGURA 59. MÉDIA DOS VALORES REGISTRADOS NAS MEDIÇÕES PARA OS TRÊS TIPOS DE CÉU NAS TRÊS SITUAÇÕES DE ILUMINAÇÃO	123
FIGURA 60. VALORES DAS ILUMINÂNCIAS NO PLANO DE TRABALHO ATRAVÉS DO DISPOSITIVO 2 DE REDIRECIONAMENTO DE LUZ.	124

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	39
QUADRO 2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA O DESEMPENHO DOS DUTOS DE LUZ SOLAR ..	46
QUADRO 3. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS PARA O DESEMPENHO DOS DUTOS DE LUZ SOLAR	47
QUADRO 4. CARACTERÍSTICAS DE TUBOS SOLARES DE DIFERENTES EMPRESAS INTERNACIONAIS.....	49
QUADRO 5. CARACTERÍSTICAS DE TUBOS SOLARES TESTADOS EM DIVERSOS EXPERIMENTOS.	50
QUADRO 6. PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES PARA A SELEÇÃO DOS MATERIAIS PARA OS TUBOS DE LUZ SOLAR ...	65
QUADRO 7. PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES PARA FAZER A ELEIÇÃO DOS MATERIAIS PARA OS TUBOS DE LUZ SOLAR	66
QUADRO 8. PASSO A PASSO DA INSTALAÇÃO DE UM TUBO SOLAR.	67
QUADRO 9. PROPOSTA DE PARÂMETROS E ADAPTAÇÕES PARA A CONFIGURAÇÃO REAL DO PROTÓTIPO	89
QUADRO 10. PARÂMETROS DE DESIGN PARA A PREVISÃO DO DESEMPENHO DO DUTO DE LUZ SOLAR - PARÂMETROS BASEADOS NAS SIMULAÇÕES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
QUADRO 11. PARÂMETROS DE DESIGN PARA A CONFIGURAÇÃO DOS DUTOS DE LUZ SOLAR-COMPONENTES DO PROTÓTIPO.	125
QUADRO 12. PARÂMETROS DE DESIGN PARA A CONFIGURAÇÃO DOS DUTOS DE LUZ SOLAR-SISTEMA DE CONTROLE DE LUZ NATURAL.....	126

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PROJEÇÕES DA DEMANDA TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA E DO PIB.	19
TABELA 2. ESTIMAÇÃO DE EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	19
TABELA 3. TARIFAS EM KWH PARA O SETOR RESIDENCIAL.....	21
TABELA 4. AVALIAÇÃO DO CONTRASTE COM TAXAS DE PROPORÇÃO DE LUMINÂNCIAS.....	29
TABELA 5. TIPOS DE CÉU DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO DA CIE	32
TABELA 6. BENEFÍCIOS OBTIDOS ATRAVÉS DA INSTALAÇÃO DE TUBOS SOLARES NO GINÁSIO DE ESPORTES ILHA DE SÃO JOÃO.	51
TABELA 7. TARIFAS DE LUZ PARA O SETOR RESIDENCIAL – B1.....	54
TABELA 8. ILUMINÂNCIAS PARA A REALIZAÇÃO DE TAREFAS DE ACORDO À NORMA TÉCNICA NBR 8995.....	55
TABELA 9. PARÂMETROS PARA A DEFINIÇÃO DO DESEMPENHO DOS DUTOS SOLARES NAS SIMULAÇÕES	63
TABELA 10. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DA SALA.	76
TABELA 11. REFLETÂNCIAS E TRANSMITÂNCIAS DOS MATERIAIS ADOPTADOS NAS SIMULAÇÕES.....	77
TABELA 12. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO COLETOR E BASE DO SISTEMA	93
TABELA 13. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PARTE DAS PEÇAS DO DIFUSOR	95
TABELA 14. ORÇAMENTO FINAL PARA O PRODUTO AO SER COMERCIALIZADO	101
TABELA 15. ORÇAMENTO FINAL COM E SEM O SISTEMA DE CONTROLE.	101
TABELA 16. DIAS E TIPOS DE CÉU DAS MEDIÇÕES REALIZADAS	102
TABELA 17. PORCENTAGEM DE ACRÉSCIMO PARA O TIPO DE CÉU CLARO	103
TABELA 18. PORCENTAGEM DE ACRÉSCIMO PARA O TIPO DE CÉU SEMICOBERTO	104
TABELA 19. PORCENTAGEM DE ACRÉSCIMO PARA O TIPO DE CÉU COBERTO.....	104
TABELA 20. VALORES DAS ILUMINÂNCIAS PARA ACHAR O NÍVEL DE TRANSMITÂNCIA DO DUTO DE LUZ.	112
TABELA 21. FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE TIPO DE CÉU PARA CURITIBA.....	113
TABELA 22. PERCENTUAL DE APROVEITAMENTO DE LUZ NATURAL CALCULADO PARA OS TRÊS TIPOS DE CÉU COM BASE AS MEDIÇÕES.....	113
TABELA 23. PERCENTUAL DE APROVEITAMENTO DE LUZ NATURAL E CÁLCULO DE ECONOMIA DE ENERGIA NOS AMBIENTES SIMULADOS.	114
TABELA 24. VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DO PALN E ECONOMIA DE ENERGIA CALCULADOS COM BASE ÀS MEDIÇÕES.....	115
TABELA 25. EFICIÊNCIA DE TRANSMISSÃO DE LUZ PARA OS TRÊS TIPOS DE CÉU.....	121

LISTA DE SIGLAS

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Eléctrica
ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BRACIER – Comitê Brasileiro da CIER
CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage*
COHAPAR – Companhia de Habitação do Estado do Paraná
COPEL – Companhia Paranaense de Energia
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EIA – Energy Information Administration
BRACIER – Comitê Brasileiro da CIER
MME – Ministério de Energia e Minas
HIS – Habitações de Interesse Social
IEA – International Energy Agency
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
PALN – Potencial de Aproveitamento da Luz Natural
PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
TDGD – Tubular Daylighting Guidance Systems
UV – Ultra-violeta
UFPR – Universidade Federal de Paraná
WLCC – Whole life cycle costing

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA	17
1.2 Problema da Pesquisa	18
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4 Justificativa.....	18
1.4.1 Justificativa Ambiental	18
1.4.2 Justificativa Socioeconômica.....	20
1.4.3 Justificativa Tecnológica	22
1.5 Visão Geral do Método.....	23
1.6 Estrutura da Dissertação.....	24
CAPÍTULO 2 – ILUMINAÇÃO NATURAL E O DUTO DE LUZ SOLAR	26
2.1 Grandezas Físicas e Princípios Físicos da iluminação Natural	26
2.1.1 Grandezas Físicas da Iluminação Natural.....	26
2.1.1.1 Componente Celeste – CC.....	26
2.1.1.2 Componente Refletida Externa - CRE	26
2.1.1.3 Componente Refletida Interna - CRI	27
2.1.1.4 Fator de luz do dia (DF).....	27
2.1.1.5 Iluminância (E).....	28
2.1.1.6 Luminância (L)	28
2.1.1.7 Uniformidade	28
2.1.1.8 Contraste	28
2.1.1.9 Ofuscamento	29
2.1.1.10 Fontes de Luz natural	29
2.1.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DA LUZ.....	33
2.1.2.1 Reflexão, Transmissão e Absorção.....	33
2.1.2.2 Refração	35
2.1.2.3 Lei do Cosseno.....	36
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ILUMINAÇÃO NATURAL	36
2.2.1 Redução de consumo energético artificial.....	36
2.2.2 Conforto lumínico e benefícios à saúde	37

2.2.3 Desvantagens da iluminação natural	38
2.3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL	40
2.3.1 Sistemas Simples	40
2.3.1.1 Tipos de Iluminação Zenital.....	40
2.3.2 Sistemas Avançados	41
2.4 O DUTO DE LUZ SOLAR	42
2.4.1 Eficiência e desempenho dos Tubos de luz solar	44
2.4.2 Parâmetros de Configuração do Duto Solar.....	46
2.4.2.1 Parâmetros Ambientais	46
2.4.2.2 Parâmetros geométricos.....	46
2.4.3 Metodologias de avaliação do desempenho de dutos de luz.	47
2.4.3.1 Ferramentas de Simulação.....	47
2.4.4 Materiais dos dutos solares.....	48
2.4.4.1 Características de dutos de Empresas Internacionais.....	48
2.4.5 Exemplos de Aplicação de Dutos Solares no Brasil.....	50
2.5 Cálculo do consumo de energia e payback em sistemas de iluminação natural	52
2.5.1 Cálculo da Economia de Energia	52
2.5.2 Cálculo do Payback.....	53
2.6 Consumo da Energia e normatividade da iluminação no setor residencial.....	54
2.7 Oportunidade e Diferencial da Pesquisa.....	55
2.8 Considerações Finais.....	56
CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA	58
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SELEÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	58
3.2 VISÃO GERAL DA ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	59
3.3 TÉCNICAS DE PESQUISA (Coleta de Dados).....	61
3.3.1 Simulações pré-configuração do duto de luz solar.....	61
3.3.1.1 Seleção de Ferramenta de Simulação.....	61
3.3.1.2 Critérios de Comparação do Desempenho dos Dutos de Luz Solar	62
3.3.1.3 Previsão do desempenho do duto solar em ambiente real de uso.....	64
3.3.1.4 Estratégia de Análise.....	64
3.3.2 Configuração do Tubo de luz Solar	65
3.3.2.1 Confecção do Protótipo	65
Definição de Matéria, Processo e Aspectos ópticos do Produto	65
3.3.2.2 Instalação do Protótipo	66
Orçamento para a configuração do tubo	67

3.3.3 Avaliação Pós-Instalação	68
3.3.3.1 Instrumentação	68
3.3.3.2 Comparação da Iluminação do Tubo de luz em condições diferentes de iluminação.....	69
Condições Ambientais	69
Pontos de Análise	69
Avaliação do Desempenho Luminoso	69
3.3.3.3 Estimativa de Economia de Energia e Payback do sistema.....	70
3.3.3.4 Estratégia de Análise.....	72
3.3.4 Análise dos Resultados - Definição de Parâmetros de Design para o desenvolvimento de dutos de luz solar	72
3.4 Considerações Finais.....	72
CAPITULO 4 – SIMULAÇÕES PRÉ-CONFIGURAÇÃO DO DUTO DE LUZ SOLAR	74
4.1 Parâmetros de Simulação	74
4.1.1 Parâmetros Ambientais de Simulação	74
Tipo de Céu	74
4.1.2 Parâmetros Geométricos de Simulação	75
4.2 Comparação do desempenho lumínico dos dutos de luz no software Troplux.....	79
4.2.1 Comparação dos três tubos para céu tipo 5 – Céu Coberto	79
4.2.2 Comparação dos três tubos para céu tipo 10 – Céu Semicoberto	81
4.2.3 Comparação dos três tubos para céu tipo 15 – Céu Claro.....	82
4.3 Seleção do tubo com melhor desempenho.	84
4.4 Simulação do desempenho lumínico do tubo de luz solar em ambiente real de uso 85	
4.4.1.. Comparação das iluminâncias para os equinócios, nos céus 5 – céu coberto, 10 – céu semicoberto e 15 – céu claro.....	86
4.4.2.... Comparação das iluminâncias para os solstícios, nos céus 5 – céu coberto, 10 – céu semicoberto e 15 – céu claro.....	87
4.4 Proposta de Adaptações para a Configuração do Protótipo	88
4.5 Considerações Finais.....	89
CAPITULO 5 – PROTOTIPAGEM E ANÁLISE PÓS-INSTALAÇÃO.....	91
5.1 Componentes do Duto de Luz Solar	92
5.1.1 Coletor e base do sistema.....	92
5.1.2 Sistema de Transporte de luz.....	93
5.1.3 Sistema de Difusão de Luz.....	94
5.1.4.3 Controle de direcionamento de luz natural	97
5.2 Orçamento Final do Protótipo do Duto de Luz Solar	101

5.3	Análise Pós-Instalação: Desempenho Lumínico do Protótipo com o Sistema de Controle de Luz.....	101
5.3.1	Incremento das iluminâncias nos 4 pontos analisados com o sistema de Controle de Luz.....	103
5.3.2	Análise Lumínica dos sistemas de Controle de Luz para o ponto 1.....	106
5.4	Análise das iluminâncias com dispositivos de redirecionamento de luz	108
5.5	Desempenho da transmitância de luz do Protótipo Desenvolvido	111
5.6	Estimativa de Economia de Energia e Payback do sistema	112
5.6.1	Cálculo de Economia de Energia	112
5.6.2	Estimativa de Payback	115
5.7	Considerações Finais	116
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE DESIGN DE DUTOS DE LUZ SOLAR		117
6.1	Parâmetros de Design com base nas simulações	117
6.1.1	Análise dos resultados da comparação entre os três protótipos simulados.....	117
6.2	Parâmetros de Design com base na fase pós-instalação.....	120
6.2.1	Configuração do Duto de Luz Solar e seleção de materiais	120
6.2.1.1	Tubo de transporte de Luz:.....	120
6.2.1.2	Base do Coletor:	120
6.2.1.3	Coletor e Difusor:.....	121
6.2.1.4	Sistema de Controle de luz e Dispositivos de redirecionamento de Luz:	121
6.2.2	Eficiência do sistema do duto solar	122
6.2.2.1	Sistema de Controle de luz:.....	122
CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		127
7.1	Conclusões	127
7.2	Recomendações para Pesquisas Futuras	128
REFERÊNCIAS.....		130
APÊNDICES.....		139
APÊNDICE 1		140
APÊNDICE 2.....		141
APÊNDICE 3.....		142
APÊNDICE 4.....		148

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

No Brasil, o crescimento econômico, o aumento da maior renda média, a inclusão social e o incremento de consumo de produtos e serviços, se refletem no aumento significativo de consumo de energia elétrica, onde o setor residencial representa uma alta porcentagem deste consumo (EPE, 2013). Considerando a previsão da grande demanda de consumo de energia, deve-se buscar o desenvolvimento de tecnologias de baixo impacto ambiental.

Com foco na redução do consumo de energético, tem sido bastante explorado o tema da energia solar como fonte alternativa na matriz energética (PURIM, 2008). No entanto, a maior parte dos trabalhos foca na conversão da energia solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e seu armazenamento em baterias ou a utilização do calor gerado pelo sol para a utilização em sistemas de aquecimento de água (PURIM, 2008).

Nota-se que no Brasil, em comparação com os países desenvolvidos, o aproveitamento da luz solar para desenvolver tecnologias de iluminação natural tem sido pouco explorado (PURIM, 2008; SOUZA, 2005). São poucos os projetos que visam explorar o uso de tecnologias de iluminação natural para reduzir o consumo de energia. A maioria dos projetos focam na iluminação artificial e não consideram a iluminação natural e os sistemas avançados como uma alternativa para reduzir este consumo (PURIM, 2008).

Uma das alternativas para a redução do consumo de energia e redução do impacto ambiental, mediante o uso de tecnologias de iluminação são os dutos de luz solar. Os dutos solares são sistemas avançados de iluminação natural que apresentam uma tecnologia mais simples e econômica em comparação a outros sistemas avançados de iluminação (KIM e KIM, 2010b). Diversos estudos têm comprovado que os dutos solares, causam menor impacto ambiental e reduzem significativamente o consumo de energia elétrica, ao usar uma fonte renovável de energia (SOTO, 2010; MAYHOUB E CARTER, 2011).

Estas tecnologias tem sido amplamente pesquisadas no contexto internacional e sob condições climáticas destes países, mas evidencia-se uma lacuna em investigações nesta área e sob condições de parâmetros brasileiros (SOUZA, 2005; SOTO, 2010). Neste sentido os parâmetros sobre dutos apresentam-se em base à literatura estrangeira.

Nesse contexto, esta pesquisa busca contribuir com esta área pouco explorada no âmbito brasileiro e desta forma dar diretrizes para aprimorar o desempenho destas tecnologias; no panorama atual de aumento de consumo de energia; onde acredita-se que a demanda pelo uso de tecnologias avançadas de iluminação natural vai aumentar significativamente.

Esta pesquisa sobre os dutos de luz solar poderá auxiliar na definição dos parâmetros de design que possam ser utilizados para diversos contextos de desenvolvimento destas tecnologias, apresentando-se recomendações e propostas para aprimorar o desempenho destes produtos e assim, delinear diretrizes para que estes produtos sejam mais competitivos com os que estão sendo atualmente comercializados.

1.2 Problema da Pesquisa

As recomendações na literatura, para dutos de luz solar encontra-se mais orientados para realizar cálculos sobre a previsão do desempenho lumínico destes sistemas, neste sentido estão considerados mais propostas de modelos matemáticos e fórmulas a partir da análise de parâmetros geométricos e ambientais. Porém, as recomendações e parâmetros de projeto para o design e configuração dutos de luz solar, como para o melhoramento desta tecnologia, principalmente dentro do cenário brasileiro não estão presentes de forma concisa.

Neste contexto, o presente trabalho visa responder a seguinte pergunta:
Como identificar e organizar os principais parâmetros de projeto para o design e configuração de dutos de luz solar?
Com base nesse problema de pesquisa são apresentados os objetivos geral e específicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é investigar os principais parâmetros de projeto para o design e a configuração de dutos de luz solar.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Identificar os parâmetros gerais de design para dutos de luz solar na literatura técnica nacional e internacional.
2. Testar os principais parâmetros para a configuração de dutos de luz solar através do emprego de uma ferramenta de simulação computacional.
3. Configurar e produzir um protótipo de duto de luz solar e testar de forma experimental o seu desempenho em ambiente real de uso.
4. Organizar os parâmetros de projeto para o design e a configuração de dutos de luz solar; como base nas simulações e experimentos, bem como as informações levantadas na literatura técnica.

1.4 Justificativa

O propósito deste estudo é somar conhecimento a questões relacionadas com energia solar, especificamente no setor da iluminação natural residencial. A justificativa para o desenvolvimento da pesquisa divide-se nos subitens que seguem.

1.4.1 Justificativa Ambiental

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2012) nas previsões de consumo de energia elétrica até o 2022, o crescimento médio anual da demanda total de eletricidade (que inclui consumidores cativos, consumidores livres e autoprodutores) será de

4,7% ao ano, passando de 496mil gigawatts-hora (GWh) em 2012 para 787 mil GWh em 2022. A tabela 1 mostra as projeções de demanda de energia no Brasil.

Tabela 1. Projeções da demanda total de energia elétrica e do PIB.

ANO	Consumo (mil GWh)	PIB (10 ⁹ R\$ 2010)	Intensidade (kWh/R\$ 2010)
2012	496	3,870	0,128
2017	627	4,822	0,130
2022	787	6,155	0,128
Período	Consumo (% ao ano)	PIB (% ao ano)	Elasticidade
2012-2017	4,8	4,5	1,06
2017-2022	4,7	5,0	0,93
2012-2022	4,7	4,7	0,99

Fonte: adaptado - EPE (2012)

A expansão média do consumo anual de energia elétrica será um pouco inferior à da economia, cuja taxa de crescimento do PIB brasileiro é estimada em 4,7% ao ano, em média, nos 10 anos. O comércio deverá ter o maior aumento na demanda na próxima década, seguido pelo setor residencial (EPE, 2012).

Para atender a este crescimento serão necessários grandes investimentos na geração de energia, observando-se projetos que não gerem impactos ambientais ou que não representem aumento nos índices de poluição (EPE, 2012).

O total de emissões antrópicas (resultantes da ação do ser humano) associadas à matriz energética brasileira atingiu 395,8 MtCO₂-eq no ano 2011, o setor residencial representa o 4,5 % destas emissões (MME, 2013).

De acordo com os dados da *U.S. Energy Information Administration* - EIA (2011), o Brasil tem a meta de reduzir para o ano 2020 as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂) de 36 a 39 % em relação ao nível projetado em 2020. Isto é o equivalente a emissão de 353-371 MtCO₂ para esse ano (EIA, 2011).

A Tabela 2 apresenta o fator de emissão de dióxido de carbono equivalente do sistema elétrico brasileiro, estimado, em tCO₂e/MWh, para os anos 2010, 2020 e 2030 estimado em estudo realizado para o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial (GOUVELLO, 2010). Os dados do Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007) foram utilizados, para estimar a evolução do fator de emissão de dióxido de carbono equivalente do setor elétrico.

Tabela 2. Estimação de emissão de dióxido de carbono do sistema elétrico brasileiro

Ano	Fator de emissões de eletricidade (tCO ₂ e/MWh)
2010	0,094
2020	0,069
2030	0,079

Fonte: adaptado de GOUVELLO, 2010

Neste contexto, o emprego de tecnologias avançadas de iluminação natural pode contribuir na redução do consumo de energia dos edifícios, bem como mitigar as emissões de carbono associadas, reduzindo o consumo de iluminação elétrica (CHOI; BELTRAM; KIM, 2011; DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011; KOMAR; DARULA, 2012).

O consumo setorial de eletricidade residencial corresponde a 23,6%, segundo o BEN (2012). Desses 14% do consumo final na carga é destinado às lâmpadas (ELETROBRAS/PROCEL, 2007).

Ao reduzir o consumo de horas de iluminação artificial, não só se reduz o consumo elétrico, se não também reduzem-se as emissões de CO₂, associadas a este consumo. Os diferentes tipos de lâmpadas, apresentam desvantagens como emissões de kg equivalentes de CO₂ e componentes tóxicos para o meio ambiente, que deve, ser descartados de forma adequada (DURÃO; WINDMÖLLER, 2008).

Para o setor residencial, os planos de redução do consumo de energia estão focados para as residências de baixa renda e a substituição do tipo de lâmpadas; como por exemplo o projeto Agente Eletrobrás, que contempla a regularização de unidades de lâmpadas residenciais, a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes para consumidores residenciais de baixa renda (BRACIER, 2012).

Os dutos de luz solar são sistemas que utilizam a energia solar luminosa, e não produzem emissões de CO₂. Embora estes tubos dependem da luz diurna, estes sistemas podem estar unidos com o sistema de iluminação elétrica mediante controles *on-off* para ativar a luz quando é necessário ou em horários noturnos (MAYHOUB e CARTER, 2012).

Considerando o emergente potencial de consumo, este estudo prevê o atendimento a requisitos ambientais do consumo de energia na fase de uso da iluminação, propondo reduzir o volume de energia destinada a esta área e causar o menor impacto meio ambiental. Os dutos solares, em comparação com outros sistemas que geram energia artificial, causa menor impacto ambiental, usam uma fonte renovável e todos os seus componentes estão feitos com materiais renováveis, que podem ser reciclados ao final da vida útil.

1.4.2 Justificativa Socioeconômica

No Brasil, o consumo de energia elétrica nas edificações vem aumentando significativamente devido ao crescimento econômico e a inclusão social, bem como ao incremento do consumo de produtos e serviços que demandam energia elétrica (MME, 2013).

O crescimento da população a uma taxa de 0,7% ao ano, aliada à queda da elasticidade-renda, trará como consequência um aumento do consumo de eletricidade per capita a um ritmo de 3,9% ao ano (EPE, 2012).

O consumo médio de energia elétrica em uma residência no Brasil varia de região para região e em função das classes socioeconômicas (LAMBERTS et al, 2010). Na Figura 1 se mostra a classificação socioeconômica por faixa de consumo de energia, na região Sul do país. O setor C, D e E, consomem 87%, 96 % e 97 % desta energia, que encontra-se nas faixas de 0 até 300 kWh/mês, respectivamente (LAMBERTS et al, 2010).

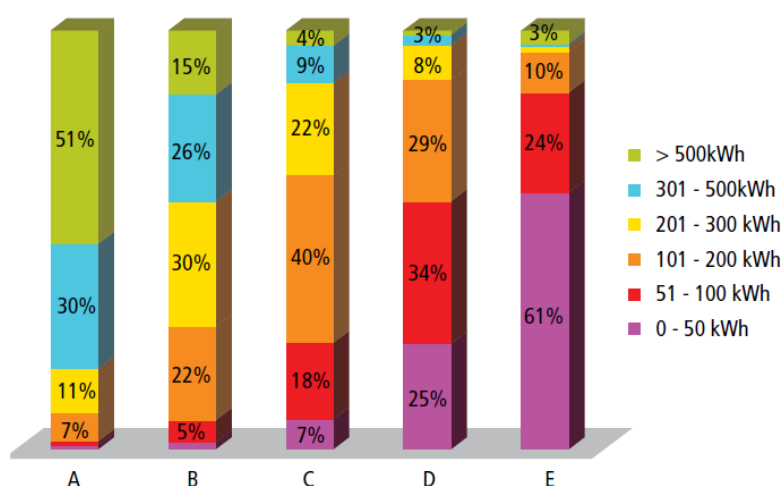


Figura 1. Classificação socioeconômica versus faixa de consumo de energia para a região Sul do Brasil.

Fonte: adaptado de Lamberts et al, 2010

A Tarifa Social de Energia Elétrica, regulamentada pela Lei 12.212, de 20.01.2010 e pela Resolução da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) 414, de 09.09.2010, é uma modalidade tarifária que oferece descontos no valor da fatura de energia elétrica até o limite de consumo de 220 kWh às unidades consumidoras da classe residencial, que sejam utilizadas por famílias de baixa renda (COPEL, 2012).

Para o setor B1 (Residencial Baixa Renda) a tarifa de acordo com a resolução da ANEEL 1565 de 09.07.2013 (COPEL, 2013) é de 0,09 R\$/KWh para consumo inferior o igual a 30 KWh, de 0,16 R\$/KWh para consumo entre 31 KWh e 100 KWh e de 0,24 R\$/KWh para consumo entre 101 KWh e 220 KWh (COPEL, 2013), como mostra a tabela 3.

Tabela 3. Tarifas em KWh para o setor residencial.

CONVENCIONAL	Resolução ANEEL Nº 1565, de 7 de julho de 2013	
Tarifa em R\$/ kWh	Resolução	Com Impostos:
B1 Residencial Baixa Renda	ANEEL	ICMS e PIS/ COFINS
Consumo mensal inferior ou igual a 30 kWh	0,09224	0,09658
Consumo mensal entre 31 kWh e 100 kWh	0,15813	0,23778
Consumo mensal entre 101 kWh e 220 kWh	0,23719	0,35667
Consumo mensal superior a 220 kWh	0,25698	0,38643

Fonte: adaptado de COPEL, 2013.

Os altos custos de investimento inicial são considerados as maiores barreiras para o uso de sistemas que melhoram a eficiência energética (BODACH e HAMHABER, 2010). Investimento adicional para implementação de medidas de eficiência energética nas habitações é raramente disponível, apesar do fato do curto período do payback devido à redução de custos de energia (BODACH e HAMHABER, 2010).

Devido a que os sistemas elétricos de iluminação de ambientes internos são responsáveis por uma significativa parcela de energia consumida nas edificações; diversos sistemas avançados de iluminação têm sido testados em diferentes pesquisas, comprovando que estas tecnologias podem reduzir significativamente o consumo de energia nas edificações (KIM e KIM, 2010b; LI et al, 2010; MAYHOUB; CARTER, 2012; WITTKOPF; YUNIARTI; SOON, 2006).

A economia de energia elétrica, em relação ao consumo de iluminação, no caso dos dutos solares tem sido comprovada no contexto brasileiro. Representando um 38 % de redução de consumo de energia utilizada para iluminação artificial (SOTO, 2010). O payback gerado a partir do uso de tubos solares, considerando parâmetros brasileiros tem sido calculado em relativo curto prazo (LIGHT, 2011).

Diferentes pesquisas, principalmente da literatura estrangeira, analisaram o desempenho lumínico dos dutos solares e a influência no conforto visual a partir do uso destes sistemas no ambiente construído. Os resultados evidenciam as vantagens destes sistemas: melhor distribuição da iluminação natural no ambiente; ao ser usado com sistemas simples de iluminação, complementam a iluminação requerida e melhoram a iluminação nas áreas mais distantes e profundas dos ambientes; da mesma forma podem suprimir a necessidade de iluminação elétrica diurna (SOUZA, 2005; SOTO, 2010; KIM e KIM, 2010 b; LI et al, 2010; MOHELNIKOVA, 2009).

Com base nas pesquisas desenvolvidas nacionalmente e internacionalmente, conclui-se que os dutos de luz solar proporcionam uma melhor distribuição da iluminação no ambiente interno, contribuindo para a melhora do conforto lumínico. Da mesma forma, também contribuem para a redução do consumo de iluminação artificial diurna.

Neste sentido, no aspecto perceptivo do design; podem ser definidos parâmetros para aprimorar e propor novas formas de manipulação da distribuição de luz natural no ambiente. Assim, variar a percepção da luz natural pelo usuário, permitindo o controle de luz desta tecnologia, adaptando diferentes níveis de iluminação, de acordo com as diferentes necessidades e usos.

Neste contexto, este estudo procura estabelecer os principais parâmetros de projeto para o desenvolvimento de uma tecnologia sustentável, direcionados ao melhoramento da iluminação no ambiente construído, como à redução do consumo elétrico destinado à iluminação; tendo como exemplo o setor residencial.

1.4.3 Justificativa Tecnológica

Nas novas edificações, com a utilização de tecnologias energeticamente eficientes desde a concepção inicial do projeto, a economia pode superar 50% do consumo, comparada com uma edificação concebida sem o uso dessas tecnologias (PROCEL, 2012).

O Brasil é um país que recebe mais irradiação solar do que países que têm liderado o mercado mundial em utilização de energia solar. Apesar de apresentar condições climáticas favoráveis, não existem muitos estudos sobre sistemas avançados de iluminação natural e os benefícios adquiridos com estes sistemas, como a economia de energia (SOUZA, 2005).

Segundo o Atlas de Irradiação Solar no Brasil (SWERA, 2006), os valores de irradiação solar global varia entre 4200 kWh/m² a 6700 kWh/m² em qualquer região do

Brasil. Como exemplo de comparação, estes valores são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, são amplamente difundidos (SWERA, 2006). Para Curitiba a radiação solar diária média varia de 6.79 kWh/m².dia a 2.85 kWh/m².dia (SWERA, 2013).

No Brasil, os dutos solares já estão sendo implementados em edificações principalmente de uso não residencial, como o caso dos dutos solares das empresas Solatube, Espacio Solar e Chatron; mas estas tecnologias estão sendo importadas, em consequência têm um elevado preço e seu uso não está totalmente difundido entre os especialistas da iluminação.

Existe uma carência de manufatura de sistemas sustentáveis de iluminação no Brasil. O investimento em tecnologia, é fundamental para o desenvolvimento do país uma vez que seus resultados refletem automaticamente no aumento da qualidade de vida das pessoas e propiciam o crescimento econômico e ambiental sustentáveis.

Esta pesquisa contribui ao desenvolvimento e manufatura destes sistemas no Brasil, ao ser de baixo custo, possibilita uma posterior produção em série e facilita a integração e instalação destes sistemas em diferentes tipos de edifícios. Devido à demanda de habitações (CAIXA, 2012), este sistema já poderia estar integrado desde o início do projeto, como também podem ser adaptados em edificações existentes.

Estes sistemas poderiam estar disponíveis no mercado brasileiro a um preço mais acessível se, com base em estudos desenvolvidos na área acadêmica, estes produtos fossem projetados, testados e construídos no Brasil e sob condições climáticas brasileiras.

Na contribuição para o campo do design está no nível de design operacional, dando uma função diferenciadora através do melhoramento de um produto, neste caso, o duto de luz solar. Com parâmetros e novas propostas para aprimorar a eficiência desta tecnologia, dentro do contexto brasileiro, pode se melhorar a competência destes sistemas avançados de iluminação natural ante outros produtos existentes no mercado.

Neste contexto, os dutos de luz solar tem uma tecnologia menos complexa em comparação com outros sistemas avançados de iluminação; e representam um investimento inicial menor (MAYHOUB; CARTER, 2012). Da mesma forma, este estudo contribui com parâmetros para o desenvolvimento e melhoramento desta tecnologia, no âmbito brasileiro, preenchendo uma área pouco explorada no Brasil.

1.5 Visão Geral do Método

A figura 2 mostra a visão geral do método utilizado nesta pesquisa. Inicialmente será feita a revisão bibliográfica da iluminação natural, sistemas avançados de iluminação, parâmetros de configuração e avaliação dos dutos solares. Com base nas informações levantadas, segue a fase experimental de desenvolvimento do duto solar, dividido em três etapas: (1ª) simulações computacionais de pré-configuração do duto de luz solar; (2ª) prototipagem do duto solar e; (3ª) avaliação pós-instalação do protótipo de duto solar em um ambiente real.

Na primeira etapa é definida mediante diferentes simulações, o design final do duto de luz, na seguinte etapa é feita a configuração e instalação do duto solar. Na seguinte etapa é realizada a avaliação do desempenho lumínico do tubo de luz solar com diferentes

dispositivos de controle de luz, como também é realizada uma estimativa do payback. Com a análise dos resultados das etapas anteriormente mencionadas, serão descritos os parâmetros de projeto para o design e configuração de dutos de luz solar, atingindo o objetivo desta pesquisa.

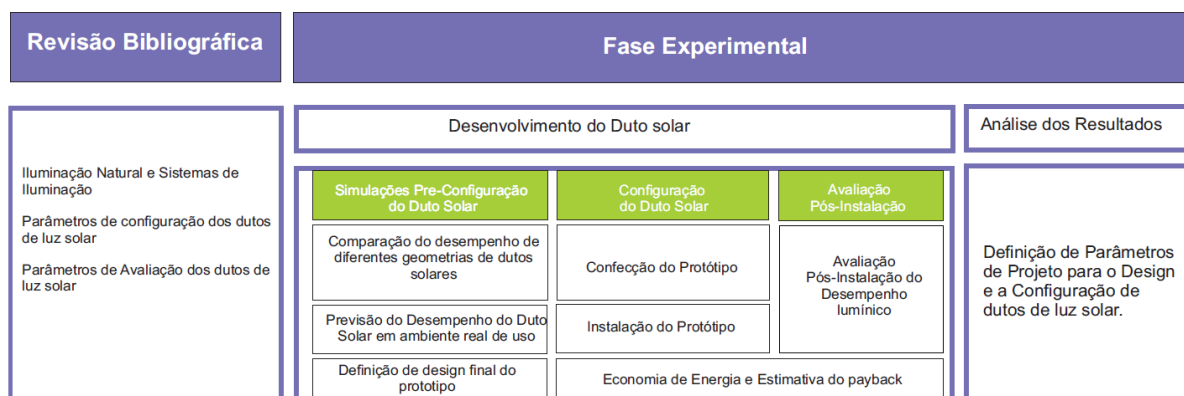


Figura 2. Visão Geral do método de Pesquisa.
Fonte: A autora

1.6 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho estará dividida em 7 subcapítulos, cujo conteúdo é explicado a seguir:

O capítulo 1 apresenta os conceitos base da pesquisa, a contextualização do tema, define o problema e objetivos. Apresenta uma visão geral do método de pesquisa e define as contribuições deste trabalho à área de design.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde são revisados os conceitos principais e os fenômenos físicos da luz como também, as propriedades e vantagens da iluminação natural, os sistemas avançados de iluminação natural, o estado da arte da tecnologia dos Dutos solares, os parâmetros de configuração e as técnicas de avaliação do desempenho destas tecnologias.

O capítulo 3 descreve o método de pesquisa, a justificação do método utilizado para cumprir o objetivo da pesquisa, são explicadas cada uma das fases, apresentando o protocolo de coleta de dados e estratégias de análise e validação.

O capítulo 4 descreve os resultados dos dados obtidos na primeira fase desta dissertação: análise de todas as simulações efetuadas na etapa de pré-configuração do produto; e são dados parâmetros a serem usados na próxima fase da pesquisa.

O capítulo 5 apresenta o procedimento para a configuração e instalação do duto de luz solar, são dados também os resultados obtidos na fase de pós-instalação do duto de luz solar, são expostos os resultados do desempenho lumínico do protótipo com diferentes

variáveis de iluminação, com base a estes resultados é analisado uma estimativa de *payback*.

O capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados e com base a isto a análise com relação ao contexto e objetivos deste estudo, serão expostos as diretrizes e parâmetros para a configuração de Dutos solares, objetivo principal desta pesquisa.

O capítulo 7 descreve as principais conclusões da pesquisa, as limitações deste estudo, são também expostas sugestões e recomendações para futuras pesquisas de acordo com os resultados obtidos e lacunas que foram detectadas.

Nos apêndices são apresentadas os materiais complementares necessários para a compreensão final da presente pesquisa.

CAPÍTULO 2 – ILUMINAÇÃO NATURAL E O DUTO DE LUZ SOLAR

No presente capítulo será apresentado a revisão da literatura que está estruturada principalmente em três partes: As grandezas e princípios físicos da luz; o duto de luz solar e o a economia de energia para os dutos de luz solar.

Por ser o foco da pesquisa, os dutos de luz solar, este tema é analisado em detalhe apresentando o estado de arte destes sistemas de iluminação natural no contexto nacional e internacional. Nesta revisão será apresentada a síntese dos parâmetros de configuração e avaliação destes sistemas, como também o cálculo de economia e payback utilizando estes sistemas de luz. Com base a apresentação e análise da revisão da literatura, é assinalado o diferencial da pesquisa, como as contribuições a área do design.

2.1 Grandezas Físicas e Princípios Físicos da iluminação Natural

2.1.1 Grandezas Físicas da Iluminação Natural

A luz distribuída ao interior do ambiente é composta de três componentes: componente celeste (CC), componente refletida externa (CRE) e componente refletida interna (CRI), a Figura 3 mostra as diferentes fontes de luz.

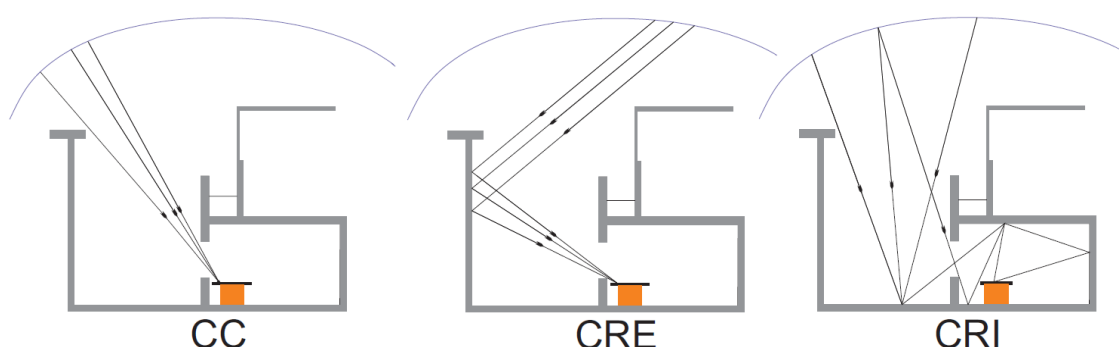


Figura 3. Fontes de luz natural que alcançam o edifício.

Fonte: adaptado de NBR 15215-2 (ABNT, 2005)

2.1.1.1 Componente Celeste – CC

O valor do componente celeste é a relação entre a iluminação diurna em um ponto interior do local dividida unicamente pela luz que provém diretamente da abóbada celeste e a iluminação exterior simultânea sobre um plano horizontal iluminado pelo total da abóbada de um céu coberto normal (ABNT, 2005).

2.1.1.2 Componente Refletida Externa - CRE

Esta componente é a luz que alcança o interior após ter sido refletida pelo entorno. Esta componente é a relação entre a iluminação diurna em um ponto interior do local, que recebe luz unicamente das superfícies externas por reflexão direta e a iluminação exterior

simultânea sobre um plano horizontal iluminado pela abóbada de um céu coberto normal. (ABNT, 2005).

2.1.1.3 Componente Refletida Interna - CRI

Esta luz alcança o ponto no interior após ter sofrido uma ou mais reflexões internas. É a relação entre a iluminação diurna em um ponto interior do local, que recebe luz unicamente por reflexão das superfícies interiores e a iluminação exterior simultaneamente sobre um plano horizontal iluminado pelo total da abóbada celeste de um céu coberto normal (ABNT, 2005).

2.1.1.4 Fator de luz do dia (DF)

Devido à variabilidade dos níveis exteriores de iluminação é difícil calcular a iluminação interior em função da iluminância fotométrica. (Baker e Steemers, 2002). O fator de luz do dia é usado para avaliar o desempenho da luz do dia nos ambientes e conhecer o nível de iluminação, usando a razão entre a iluminância em um ponto na superfície de trabalho (EP), e a iluminância horizontal externa no mesmo instante (Eh ext.), esta relação expressada em porcentagem está sinalada com a Equação 1 (ABNT, 2005; Baker e Steemers, 2002).

Este índice é definido como a razão entre a iluminância em um ponto na superfície de trabalho (EP), e a iluminância horizontal externa no mesmo instante (Eh ext). (ABNT, 2005), de acordo com a Equação 1.

$$FLD = \frac{E_P}{E_{h_{ext}}} \times 100\% \quad (1)$$

Para o cálculo do FLD, a contribuição da luz direta do sol não é levada em consideração, devido ao ganho de calor, degradação dos materiais e ofuscamento (ABNT, 2005). Assim, por ser calculado apenas através do modelo de céu encoberto, definido pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*); o FLD oferece algumas limitações que devem ser levadas em conta ao se avaliar a iluminação do ambiente. Entre elas está o fato de ser invariável quanto à orientação do edifício, por considerar apenas o céu encoberto, que possui uma distribuição de luminâncias homogênea pela abóbada celeste, e não considerar a possibilidade de ocorrência de iluminação excessiva e ganho de calor.

O conceito de fator de luz do dia é válido somente para condições de céu encoberto, quando não há incidência de luz solar direta. É constituído pela contribuição das três componentes de iluminação: CC+CRE+CRI (SOTO, 2010).

Nabil e Mardaljevic (2006) indicaram uma alternativa para o fator de luz do dia (DF). Seu método, chamado de iluminâncias úteis da luz do dia (UDI), tem como objetivo definir e classificar a distribuição de iluminâncias luz do dia de acordo com uma escala pré-definida de quatro níveis de utilidade:

- Nível baixo de utilidade (UDI baixo): iluminâncias luz do dia a menos de 100 lx.
- Nível de utilidade Aceitável (UDI aceitável): iluminâncias luz do dia entre 100-500 lx.

- Nível Desejável (UDI desejável): iluminâncias luz do dia entre 500-2000 lx.
- Nível indesejável (UDI): iluminâncias diurnas superiores a 2000 lx (NABIL e MARDALJEVIC, 2006).

Este método não é adequado para medir diretamente a eficiência óptica dos sistemas de iluminação natural. No entanto, eles são úteis como uma referência de comparação para estimar o grau de utilidade de um coletor solar (PELEGRI, 2009).

2.1.1.5 Iluminância (E)

Indica a quantidade de luz (lumens - lm) por unidade de área (m²) que chega em um determinado ponto. O nível de iluminação pode ser medido, porém não visto. O que é percebido são as diferenças na reflexão da luz incidente. Sua unidade é o lux, ou lm/m² (ABNT, 2005). O fluxo luminoso é assim, a razão entre a energia luminosa emitida por uma fonte e o tempo de emissão. A unidade de fluxo luminoso no Sistema Internacional é o lúmen.

$$E = \frac{\Phi(\text{fluxo})}{\text{Área}} = \frac{(\text{lm})}{(\text{m}^2)} = \text{lux}$$

2.1.1.6 Luminância (L)

Denota a intensidade por metro quadrado de área aparente da fonte de luz ou de uma superfície iluminada. É o coeficiente do fluxo luminoso num elemento da superfície ao redor de um ponto. Segundo Hopkinson; Petherbridge e Longmore (1975), é necessário que se faça a distinção entre “brilho físico” de um objeto (medido por um fotômetro) e o “brilho subjetivo” desse objeto, visto pelos olhos adaptados ao ambiente. A luminância é dependente tanto do nível de iluminação quanto das características de reflexão da própria superfície. A unidade é o nit ou cd/m².

2.1.1.7 Uniformidade

A uniformidade de iluminância (U_o) é determinada através da relação entre a iluminância mínima (E_{mín}) de uma superfície e a média aritmética das iluminâncias (E_{méd}) nesta superfície, como mostra a expressão:

$$U_o = E_{mín}/E_{méd}$$

2.1.1.8 Contraste

Lamberts, Dutra e Pereira (1997) definem o contraste como a relação entre a luminância de um objeto e o seu entorno imediato. Por ser uma medida relativa, a percepção do contraste também é relativa. Desse modo, um objeto pode parecer mais ou menos brilhante dependendo do brilho do seu entorno. A tabela 4 mostra a relação de contraste para diferentes campos visuais. Quantitativamente o contraste é determinado pela expressão:

$$C = (L_{obj.} - L_{fundo}) / L_{fundo}$$

Tabela 4. Avaliação do contraste com taxas de proporção de luminâncias.

Proporção	Relação
Entre a tarefa e o entorno imediato	3:1
Entre a tarefa e superfícies escuras mais afastadas	10:1
Entre a tarefa e superfícies claras mais afastadas	0,1:1
Entre a fonte de luz (natural ou artificial) e superfícies adjacentes	20:1
Máximo Contraste em qualquer parte do campo de visão	40:1

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (1997).

2.1.1.9 Ofuscamento

Lamberts, Dutra e Pereira (1997) definem o ofuscamento a variação muito grande de iluminação a uma velocidade grande que causa perturbação da visão. Esta sensação produzida pela luminância com o campo visual que é suficientemente maior que a luminância a qual os olhos estão adaptados para causar incômodo, desconforto ou perda na performance visual e visibilidade. A magnitude da sensação de ofuscamento depende de alguns fatores como o tamanho, posição e luminância de uma fonte, o número de fontes e a luminância a qual os olhos estão adaptados.

2.1.1.10 Fontes de Luz natural

a) Luz Solar Direta

A luz é definida, em termos físicos, como a banda de energia radiante eletromagnética situada entre determinados comprimentos de onda a que o olho humano é sensível (HOPKINSON; PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1975). É necessário conhecer o comportamento da fonte luminosa, separando a luz direta do sol da luz do céu e tratando cada uma de modo diferente, para poder prever e calcular o aproveitamento da iluminação natural em um projeto. O sol é uma fonte concentrada, e pode ser considerado como uma fonte luminosa pontual, ao passo que o céu é uma fonte grande e difusa com uma distribuição de luminância variável.

As fontes de luz natural podem ser caracterizadas como diretas (luz do sol e luz difusa do céu), e indiretas (luz de difusores refletivos ou translúcidos que foram originalmente iluminados por outras fontes primárias ou secundárias).

O movimento aparente do sol através do céu é usualmente determinado por dois ângulos: O ângulo da altitude solar (h_s), que mede o deslocamento vertical do sol; e o ângulo da azimuth (γ_s) que mede o deslocamento horizontal do céu (MESSENGER e VENTRE, 2000).

b) Luz do Sol

A luz do sol ilumina uma superfície normal com 6.000 a 100.000 lux. Este valor é muito intenso para ser usado diretamente sobre o plano de trabalho (LECHNER, 2001). A luz solar, de características físicas bem definidas, é branca e o seu espectro é completo e

contínuo, contendo todos os comprimentos de onda de luz visível (radiações coloridas) e em quantidades similares (FREEDMAN, 2010).

Segundo fundamenta Lamberts, Dutra e Pereira (1997), aproximadamente a metade da energia está na região visível, o restante no infravermelho e no ultravioleta. A alta eficiência luminosa e a excelente reprodução de cores da luz solar associados ao fato de que a mesma é abundante durante a maior parte do horário de trabalho e ao longo do transcurso do ano conduzem ao seu aproveitamento como fonte de luz para iluminação de ambientes internos.

Como sugere Souza (1997), podem-se usar recursos para torná-la uma fonte refletida o que faria com que os níveis de iluminação sejam menores do que os obtidos pelos raios solares diretos e fazendo com que o foco direcional desta fonte de luz seja mais uniformemente distribuído pelo ambiente que se deseja iluminar.

A direção dos raios solares ou da luz solar direta é definida a partir de dois ângulos: o azimute e a altitude do sol (Figura 4). O azimute do sol corresponde ao ângulo horizontal definido entre a projeção horizontal dos raios solares e o norte verdadeiro ou geográfico. A altitude do sol é o ângulo vertical entre os raios solares e uma superfície horizontal. Vários diagramas solares ilustram a trajetória do sol ao longo do dia e do ano para diversas latitudes (LECHNER, 2001).

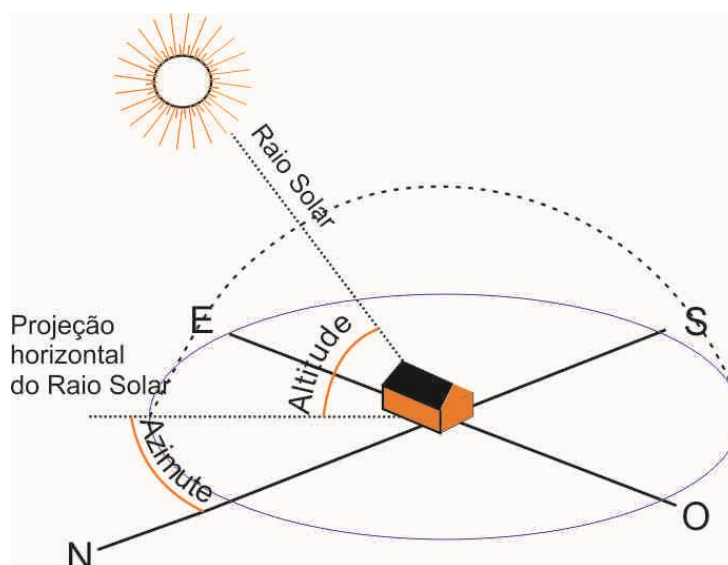


Figura 4. Definição dos ângulos de altitude e azimute do sol.

Fonte: Adaptado de Lechner, 2001

c) Luz do Céu

A luz do céu é o resultado da refração e da reflexão da luz solar ao passar pela atmosfera. Enquanto a luz solar é uma fonte pontual, a luz do céu é uma fonte superficial. Ela produz uma iluminação suave, não direcional, relativamente sem sombras. Os níveis de iluminação resultantes são menores do que o produzido pela luz solar direta; podendo ter uma variação de 5 a 20 kLux (Souza, 2003).

A composição espectral da luz do céu varia segundo a hora do dia, a estação do ano, a altitude e as condições atmosféricas ou meteorológicas. Porém, pode-se considerar

que de um modo geral a luz do céu é rica em azuis e pobre em vermelhos (LECHNER, 2001).

A luz natural é proporcionada pelo Sol, porém sua aparência, distribuição e quantificação estão condicionadas a predominância da condição atmosférica da abóbada celeste. Segundo Pereira (1995) a distribuição das luminâncias da abóbada celeste varia de acordo com as condições atmosféricas e as condições de céu empregadas nas técnicas de simulação são: céu claro, céu parcialmente encoberto e céu encoberto.

A NBR 15215 (ABNT, 2005) adota a caracterização das condições do céu, utilizando o método da cobertura do céu preconizado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, EUA), sendo que a cobertura é estimada visualmente pela observação do montante de cobertura de nuvens. Esta cobertura de nuvens é estimada em percentual e expressa numa escala de 0 a 100%. Portanto, apresenta-se as seguintes condições de céus:

- Céu claro: 0% a 35%
- Céu parcialmente encoberto: 35% a 75%
- Céu encoberto: 75% a 100%.

Numa condição de **céu claro** (inexistência de nuvens e baixa nebulosidade), as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os comprimentos de onda da porção azul do espectro cheguem à superfície da terra, conferindo esta cor ao céu. Sob estas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a 90° do sol e sua parte mais brilhante ao redor deste.

De acordo com Moore (1991) sob estas condições as superfícies que refletem a luz do Sol tornam-se importantes fontes secundárias de luz natural, já que a luz do Sol é muito forte para ser usada diretamente sobre uma área de trabalho. Em condições de céu limpo, o nível de iluminância é bastante elevado, apresentando valores entre 60.000 e 100.000 lux (LECHNER, 2001).

O céu parcialmente nublado ou encoberto é uma combinação de céu claro, de fundo, com nuvens sobrepostas nele. A dificuldade neste tipo de céu é padronizar a intensidade de sua luminância, pois esta varia ao longo das horas e, pode apresentar-se muito diferente de um dia para o outro, dependendo da quantidade de nuvens formadas na atmosfera (MOORE, 1991). No céu parcialmente encoberto está a abóbada encoberta com a presença sazonal do sol alternada por períodos de nebulosidade variável. Este céu é próprio do clima temperado úmido ou quente úmido (MASCARÓ, 1981).

O céu encoberto resulta da reflexão/refração da luz direta do Sol, em grandes partículas de água em suspensão na atmosfera. O resultado é uma abóbada cinza-claro com a porção zenital apresentando uma luminância maior do que a da porção próxima à linha do horizonte. A altura solar afeta a luminância de céus encobertos e que em qualquer latitude um céu encoberto pode ser duas vezes mais brilhante no verão do que no Inverno (PEREIRA, 1995).

A iluminância de um céu encoberto é relativamente baixa (entre os 5.000 e 20.000 lux) e normalmente três vezes superior no zênite do que no horizonte (LECHNER, 2001). A figura 5 mostra os três tipos principais de céu a serem considerados nesta pesquisa, tanto na parte de simulações, como na fase de medições de pós-instalação em ambiente real de uso.

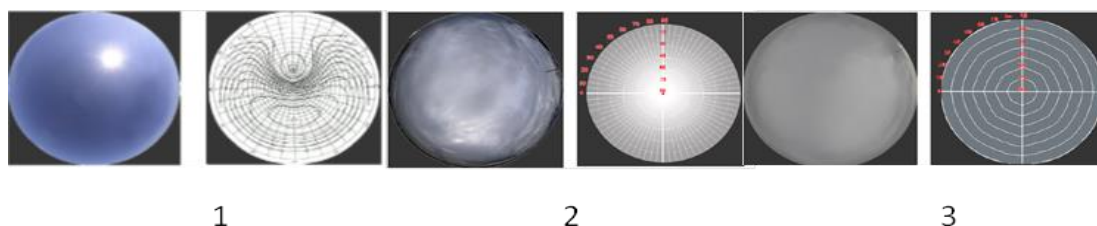


Figura 5.Céu Claro (1), Céu Parcialmente Coberto (2), Céu Encoberto (3).

Fonte: Adaptado de Baker e Steemers, 2002

A CIE adotou uma classificação padrão para avaliar as condições de céu. Essa classificação serve como referência para definir e categorizar os diferentes tipos de céu. Fatores como disponibilidade de luz solar direta, padrões climáticos das nuvens e distribuição são aplicados neste processo de classificação (CIE, 2003). A Tabela 5 apresenta uma revisão dos 15 tipos de céu standardizados e reconhecidos pela CIE em 2003.

Tabela 5.Tipos de céu de acordo com a classificação da CIE

Num	Descrição - Inglês	Classificação	Detalhamento - português
1	Overcast, steep gradation (approx. CIE overcast)	Encoberto	Gradação alta (Aproxima-se do Céu Encoberto CIE Tradicional)
2	Overcast, steep gradation, brightening towards sun	Encoberto	Gradação alta, Brilho aumenta na direção ao Sol
3	Overcast, moderate gradation, uniform in azimuth	Encoberto	Gradação moderada, uniforme em azimute
4	Overcast, moderate gradation, brightening towards sun	Encoberto	Gradação moderada, Brilho aumenta na direção ao Sol
5	Uniform sky	Encoberto	Céu Uniforme
6	Partly cloudy, moderately graded, brightening towards sun	Parcialmente nublado	Gradação moderada, brilho aumenta na direção ao Sol.
7	Partly cloudy, moderately graded, brighter circumsolar	Parcialmente nublado	Gradação moderada, região solar mais brilhante.
8	Partly cloudy, rather uniform, clear solar corona	Parcialmente nublado	Relativamente uniforme, coroa solar limpa.
9	Partly cloudy, shaded sun position	Parcialmente nublado	Sol sombreado.
10	Partly cloudy, brighter circumsolar	Parcialmente nublado	Região solar mais brilhante.
11	White-blue sky with clear solar corona	Claro	Céu branco-azulado com coroa solar limpa
12	CIE clear sky with low turbidity	Claro	Céu claro padrão CIE clássico com baixa turbidez
13	CIE clear sky with higher turbidity	Claro	Céu claro padrão CIE clássico, com alta turbidez.
14	Cloudless turbid with broader solar corona	Claro	Céu com turbidez sem nuvens com coroa solar ampla
15	White-blue turbid sky with wide solar corona	Claro	Céu branco-azulado com turbidez e ampla coroa solar

Fonte: Adaptado da CIE (2003) e TROPLUX (2011).

Luz de Fontes Indiretas

Quando uma superfície refletiva fosca é iluminada por uma fonte primária, sua luminância resultante a torna uma fonte indireta de iluminação. Uma vez que esta superfície pode ser considerada como difusora ela se torna, então, uma fonte distribuída - a qualidade e distribuição de sua luz sendo virtualmente idêntica à luz direta do céu admitida através de uma abertura de tamanho similar. Se iluminada diretamente pelo sol, a iluminação refletida por uma superfície branca pode variar de 50 kLux a 100 kLux, substancialmente maior que a luminância da abobada celeste (SOUZA, 2003). A figura 6 mostra as diferentes fontes de luz que incidem sobre um edifício.

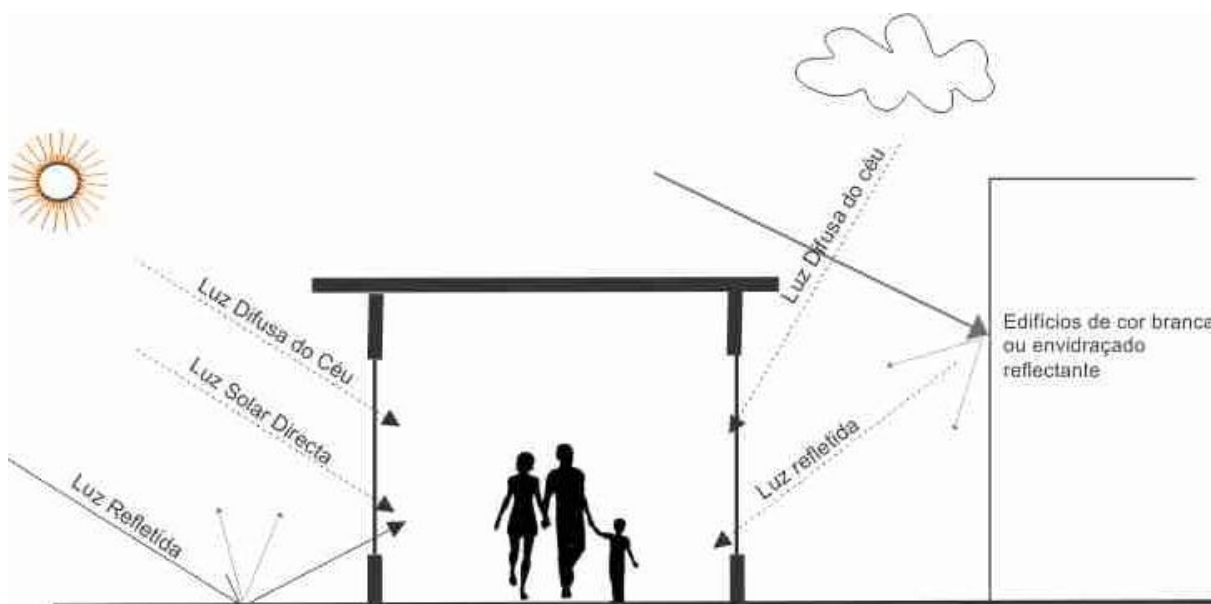


Figura 6. Componentes da luz natural – luz solar direta, luz do céu difusa, luz refletida.
Fonte: Adaptado de Lechner, 2001.

2.1.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DA LUZ

A percepção do espaço arquitetônico deve-se, principalmente, a reflexão da luz nas superfícies, mesmo que se detecte uma fonte de luminosidade direta. A maioria da luz fornecida ao espaço para execução de uma tarefa não é proveniente diretamente de sua fonte principal (do céu ou de uma fonte artificial), mas sim de superfícies refletidas. Isto depende da propriedade da superfície atingida pela luz, tais como sua textura (lisa ou rugosa), refletância e cor.

A luz ao incidir numa superfície pode-se comportar de diferentes maneiras. Esta pode ser refletida, transmitida, refratada e/ou difratada e em qualquer destas situações a luz pode ser absorvida.

2.1.2.1 Reflexão, Transmissão e Absorção

De acordo com Baker e Steemers(2002) podem ocorrer três possíveis fenômenos quando a luz incide em uma superfície:

- A luz pode ser refletida – a relação entre a energia refletida e a energia incidente é chamada de refletância, R .
- A luz pode ser transmitida - a relação entre a energia transmitida e a energia incidente é chamada de transmitância, T .
- Em ambos os casos a energia pode ser absorvida - a relação entre a energia absorvida e a energia incidente é chamada de absorptância.

Quando a luz é refletida por uma superfície tem o nome de reflexão. A reflexão pode ser especular, difusa ou a combinação de ambas. A reflexão especular acontece quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (Baker e Steemers, 2002).

A reflexão difusa significa que o fluxo de luz incidente é refletido em todas as direções, embora o raio incidente possa ser direto (unidirecional) ou não (Figura 7). Quando são combinadas ambas as componentes, difusa e especular, o fluxo de luz é refletido segundo uma direção dominante e parcialmente difundida por irregularidades da superfície. A razão entre o fluxo de luz refletido e o fluxo de luz incidente é denominada de refletância.

Considerando a refletância, uma superfície totalmente preta pode ser igual a 0, uma superfície perfeitamente branca pode ser igual a 1, e as superfícies reais encontram-se dentre esses dois valores. As propriedades dos materiais opacos e transparentes variam de acordo com a função e direção da luz incidente.

Se uma superfície é opaca diz-se que ela é especular, ou seja, forma uma imagem tal como o espelho, sendo o raio refletido igual ao raio incidente, denominada de lei da reflexão. Se um material transparente é descrito como especular isto significa que o raio de luz transmitido é guiado sem ser disperso e espalhado, isto significa que pode ser focado através do material (Baker E Steemers, 2002).

Quando a luz é transmitida, a este fenômeno físico é chamado de transmissão. A transmissão pode igualmente ser especular, difusa ou a combinação de ambas. A transmissão especular significa que o fluxo de luz é transmitido sem qualquer dispersão ou difusão, e a transmissão difusa sucede quando o fluxo de luz incidente é transmitido em todas as direções. A razão entre o fluxo de luz transmitido e o fluxo de luz incidente é denominada de transmitância (T) (Baker e Steemers, 2002).

Quando a superfície é lisa e transparente, a transmissão e a reflexão são especulares, (a luz transmitida não sofre interferência em sua trajetória e a reflexão da luz para o exterior é semelhante a um espelho). Através das superfícies transparentes e rugosas, como o vidro translúcido e o vidro martelado, a luz é transmitida e refletida de maneira difusa (MOORE, 1991). A figura 7 mostra a interação da luz com as superfícies.

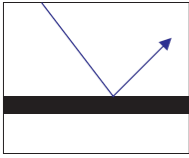
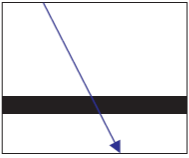
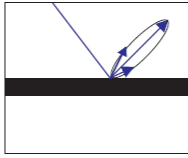
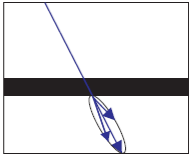
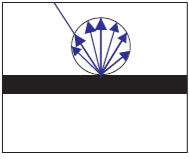
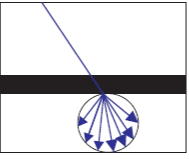
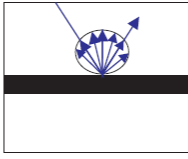
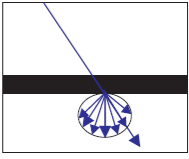
REFLEXÃO	TRANSMISSÃO	REFLEXÃO	TRANSMISSÃO
			
ESPECULAR - $\Delta = 0$		DISPERSÃO ESTREITA - $0 < \Delta < 15$	
			
DIFUSO - $45 < \Delta < 60$		DIFUSO + ESPECULAR	

Figura 7. Interação da luz com as superfícies.
Fonte: Adaptado de Baker e Steemers, 2002

2.1.2.2 Refração

A refração sucede quando a luz passa de um meio para outro diferente e acontece uma mudança de direção e variação na velocidade de propagação dos raios de luz (Ryer, 1998). Este fenómeno é dependente de dois fatores: o ângulo de incidência dos raios de luz, i , e o índice de refração, n , do material (Ryer, 1998) (Figura 8).

A refração é um efeito que ocorre entre materiais transparentes de densidades diferentes, tais como o ar e o vidro. É caracterizado pela alteração na direção de propagação da luz ao mudar de meio de propagação. A refração depende de dois fatores: o ângulo do incidente (i) e o índice refrativo (n) do material (CIAMPINI, 2005).

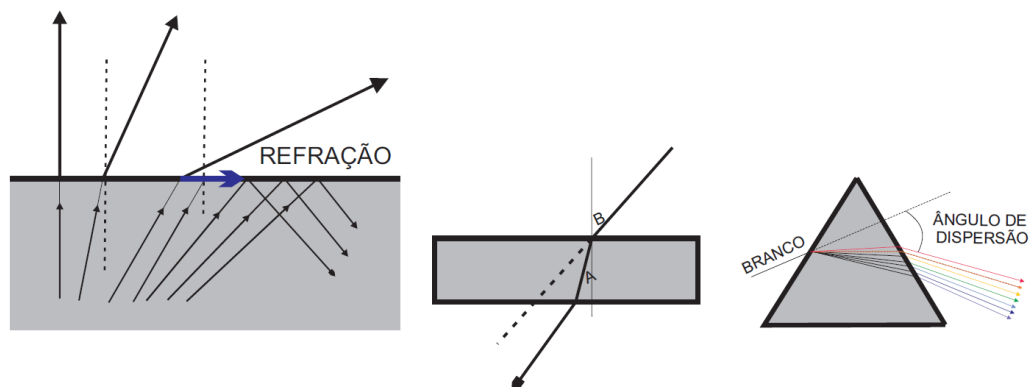


Figura 8. Princípio de Refração.
Fonte: Adaptado de Ryer, 1998

2.1.2.3 Lei do Cosseno

A iluminação numa superfície varia com o cosseno do ângulo entre a normal à superfície e o raio de luz. Ela é máxima quando o raio é normal à superfície, ou seja, quando o ângulo de incidência $\theta = 0^\circ$. Em qualquer outro caso o raio de luz cobrirá uma área maior, com uma consequente redução no nível de iluminação (MOORE, 1991). A maior ângulo de incidência, menor a luminância da superfície. A lei de cosseno está dada pela seguinte fórmula:

$$E_\theta = E \cos\theta \quad (2)$$

E_θ é a iluminância medida na superfície iluminada, E é a iluminância medida ao plano perpendicular em relação à direção um feixe de luz colimado isotrópico e θ é o ângulo de incidência em relação da superfície normal iluminada. (TAYLOR, 2000).

Considerando isto, a entrada da iluminância E_{in} na superfície frontal (abertura de entrada) do coletor solar é diretamente dependente do ângulo de incidência θ_i de luz: $E_{in} = E \cos\theta$ (PELEGRINI, 2009).

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ILUMINAÇÃO NATURAL

A iluminação natural é uma estratégia efetiva de desenvolvimento para aprimorar os problemas de adequado uso e energia, os problemas ambientais causados pelo uso de energia artificial e melhorar a saúde e o conforto visual (Li et al, 2010).

Além do reconhecido potencial de economia de energia quando substitui ou complementa a iluminação artificial, a iluminação natural oferece benefícios à saúde física e psicológica dos seres humanos, elevada qualidade na reprodução de cor e melhor desenvolvimento de tarefas visuais. Muitos estudos comprovaram a preferência dos usuários pela luz natural como fonte de luz em edificações (EDWARDS; TORCELLINI, 2002).

Uma vantagem reconhecida da iluminação natural é a economia de energia reduzindo substancialmente o consumo da iluminação elétrica e o impacto ambiental (WANG; ABDUL-RAHMAN; RAO, 2010; LI et al, 2010; IHM; NEMRI; KRARTI, 2009).

2.2.1 Redução de consumo energético artificial

Por eficiência energética entende-se a obtenção de um serviço com baixo gasto de energia, portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). Com o uso da iluminação natural pode-se reduzir o uso de iluminação artificial. Um melhor aproveitamento da irradiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas sofisticadas de arquitetura e construção (MME, 2007).

Um estudo desenvolvido por Ihm, Nemri e Krarti (2009) comprovou que, no caso de escritórios, pode-se poupar cerca de 60% de energia em iluminação usando-se uma estratégia de controle de iluminação natural como *dimmers*, especialmente nos espaços perimetrais que estão mais expostos à luz natural.

Outro estudo desenvolvido por Yun, Kim e Kim (2012) constata que com o emprego de sistemas de controle de iluminação natural pode-se poupar até 47% de energia associada à iluminação. A energia mais barata e mais eficiente é aquela que deixamos de usar, substituindo-a por fontes alternativas (LI et al, 2010).

2.2.2 Conforto lumínico e benefícios à saúde

Conforto lumínico ou visual, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (1997), é entendido como a existência de um conjunto de condições em determinado ambiente, no qual o ser humano pode desenvolver suas tarefas visuais com o máximo de acuidade (medida da habilidade do olho humano em discernir detalhes) e precisão visual.

Uma parte essencial do projeto de um ambiente interno é fornecer a iluminação necessária para poder desenvolver tarefas visuais, bem como um sistema de iluminação saudável. A máxima utilização de luz natural é um das abordagens promissoras para a saúde visual. Com base na fotometria, os critérios médicos, psicológicos e fisiológicos, as diversas necessidades humanas devem ser acomodadas (KIM; KIM, 2010a).

Os aspectos da qualidade da luz natural também trazem benefícios na percepção dos ambientes internos, porque ativam a dinâmica dos espaços arquitetônicos. A iluminação natural é um elemento eficaz de design que serve para reforçar e enriquecer a estética e os aspectos psicológicos do espaço arquitetônico. A luz do dia promove os aspectos visuais nos espaços quando está distribuída adequadamente (AMMAN; HOURANI; HAMMAD, 2012).

Nota-se que o brilho é muito mais tolerado quando vindo de uma fonte de luz natural do que a partir do seu equivalente artificial (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). A claridade do ambiente de trabalho é determinada não apenas pela intensidade da luz, mas, também, pelas distâncias e pelo índice de reflexão das paredes, teto, piso, máquinas e mobiliário. Um bom sistema de iluminação, com uso adequado de cores e a criação de contrastes, pode produzir um ambiente agradável, onde as pessoas possam trabalhar confortavelmente (FIEDLER; VENTUROLI; MINETTI, 2006).

Galasiu e Veitch (2006) mostraram um estudo sobre as preferências dos ocupantes e a satisfação com o ambiente luminoso, que há uma forte preferência pela luz do dia nos locais de trabalho, associada particularmente com a crença de que a luz do dia apresenta benefícios para a saúde.

A iluminação natural é essencial à vida humana. A luz desencadeia processos metabólicos, estimula funções biológicas essenciais no cérebro e tem sido associada com maior produtividade, menor absentismo, menos erros ou defeitos em produtos, atitudes positivas e fadiga reduzida (EDWARDS; TORCELLINI, 2002). Um número significativamente menor de incidentes de fadiga ocular são reportados por pessoas cujas estações de trabalho receberam grandes proporções de luz natural (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011).

A luz do dia é um fator preponderante na forma como os espaços são percebidos pelos usuários (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). A luz do dia entrega a iluminação necessária para as atividades internas e fornece ligação visual entre o interior e o exterior dos ambientes. (LI *et al*, 2010; WITTKOPF; YUNIARTI; SOON, 2006).

A iluminação natural é essencial ao nosso biorritmo, conhecido como ciclo circadiano. Diferentes investigações têm identificado os benefícios da luz natural em edifícios para a saúde e bem-estar dos ocupantes, incluindo a sua necessidade para a regulação do ritmo circadiano (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). O ritmo ou ciclo circadiano é responsável por sincronizar nosso relógio interno de 24 horas (BAKER e STEEMERS, 2002).

Segundo Baker e Steemers (2002), diversos experimentos têm mostrado que o ciclo circadiano continua a ocorrer mesmo sem o estímulo da luz natural, entretanto, ele atrasa 1 hora e 10 minutos a cada 24 horas. A ação da luz natural acelera o ciclo circadiano do corpo, de forma a fazê-lo coincidir com o ciclo diário de 24h. Em alguns indivíduos, a alteração do ciclo circadiano ocasiona uma condição conhecida como SAD (Desordem Emocional Sazonal/*Seasonal Affective Disorder*) (BAKER; STEEMERS, 2002).

A SAD é uma forma de depressão que está relacionada com a quantidade de luz disponível para o indivíduo, bem como a disponibilidade de luz natural externa no inverno. É conhecida como a “depressão do inverno”, pois durante esta época do ano, com noites mais longas e dias mais curtos, a ausência de luz provoca nos indivíduos um aumento nos sentimentos depressivos e redução de interesse na maioria das atividades cotidianas (BAKER; STEEMERS, 2002).

Diversos estudos têm mostrado os benefícios da luz sobre a qualidade dos ambientes internos para as pessoas, o estudo desenvolvido por Choi et al (2011) evidencia a relação da iluminação natural nos ambientes interiores na duração do tempo de permanência do pacientes hospitalizados (*average length of stay* - ALOS), o estudo conclui que dependendo do tipo de doença, os benefícios fisiológicos fornecidos pela luz do dia podem ser favoráveis para ter uma recuperação mais acelerada. Os pacientes que permanecem em ambientes onde recebe-se maior luz solar, tem um ALOS mais curto (CHOI; BELTRAN; KIM, 2012).

2.2.3 Desvantagens da iluminação natural

A luz solar também pode produzir efeitos negativos nos ambientes e para o conforto visual das pessoas, como ofuscamentos, contrastes excessivos, iluminação muito elevada, sobreaquecimento, exposição excessiva ao sol, os quais interferem também com o conforto térmico, com o desenvolvimento de tarefas visuais e geram maior gasto energético (SOUZA, 2005; SAITER, 2005; YAO; ZHU, 2012).

Um bom projeto de arquitetura deveria utilizar o máximo da iluminação natural sem causar fortes contrastes, ofuscamento, reflexos e deve melhorar a uniformidade da iluminância interior nos ambientes (SHEN; TZEMPELIKOS, 2012). Os problemas de ofuscamento geralmente são causados pela grande quantidade de luz diurna que entra em espaços altamente envidraçados como edifícios de escritórios (DUBOIS; BLOMSTERBERG, 2011). Outra desvantagem da luz solar excessiva são os raios ultravioleta (UV), que podem ser muito prejudiciais para quem está exposto por uma grande quantidade de tempo perto de janelas e aberturas desprovidas de um sistema de proteção adequado (KIM; KIM, 2010 a).

Ao aumentar a luz direta para a iluminação interior dos espaços, se esta não for adequadamente regulada, pode introduzir calor excessivo dentro dos prédios e, portanto, aumentar a demanda de refrigeração (PELEGRINI; HARRISON; SHACKLETON, 2007; YAO; ZHU, 2012).

As áreas grandes de fenestração muitas vezes resultam em ganhos solares excessivos. A iluminação natural excessiva pode gerar o aumento no consumo de energia se a carga usada para refrigeração adicional devido à luz excede e não compensa a energia

economizada com a redução do uso da iluminação elétrica (TZEMPELIKOS e ATHIENITIS, 2007).

O desconforto visual causado pela luz excessiva pode ser evitado através da instalação de dispositivos de proteção solar adequados, tais como persianas verticais ou horizontais (CHOI; BELTRAM; KIM, 2011); ou janelas eficientes com vidros eletrocromicos ou termotrópicos, de maneira a poder controlar e ajustar os valores das iluminâncias (YAO; ZHU, 2012). As principais vantagens e desvantagens da iluminação natural estão resumidos no quadro 1.

Vantagem- Desvantagem			Autor
Vantagem	Saúde	A iluminação natural apresenta importantes contribuições à saúde visual.	Kim; Kim (2010a)
		Regula o ciclo circadiano do corpo	Dubois; Blomsterberg (2011). Baker e Steemers (2002)
		Fonte de Vitamina D, ajuda a prevenir doenças.	Edwards; Torcellini, 2002
	Economia de Energia	Utilizando iluminação natural pode-se poupar até 60% de energia (Edifícios de escritórios).	Ihm, Nemri e Krarti. (2009)
		47 % de economia de energia	Yun, Kim e Kim (2012)
	Conforto Lumínico	Melhora do conforto lumínico	Yun, Kim e Kim (2012).
		Menos incidentes de fadiga ocular	(Amman; Hourani; Hammad, 2012).
	Dinâmica do espaços	A luz do dia promove os aspectos visuais nos espaços arquitetônicos quando está distribuída adequadamente.	Amman; Hourani; Hammad, 2012). Fiedler; Venturoll; Minetti, 2006
Desvantagem	Radiação UV	Exposição a raios UV, lugares perto das janelas que não possuem adequada proteção.	Kim; Kim (2010a)
	Ofuscamento, brilhos, contraste, desconforto visual	Os problemas de ofuscamento geralmente são causados pela grande quantidade de luz diurna. Reflexos excessivos no plano de trabalho.	Dubois; Blomsterberg, (2011). Shen; Tzempelikos, 2012
	Sobreaquecimento	Pode introduzir calor excessivo dentro dos prédios e, portanto, aumentar a demanda de refrigeração e consumo de energia.	Pelegriani, Harrison, Shackleton (2007) Tzempelikos e Athienitis(2007)

Quadro 1. Vantagens e desvantagens da iluminação natural

Para reduzir estes efeitos negativos que pode ocasionar a iluminação natural é necessário o uso de sistemas e tecnologias avançadas de iluminação natural, buscando potencializar as vantagens da luz do dia e sua distribuição uniforme nos ambientes.

2.3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

2.3.1 Sistemas Simples

Dentro dos sistemas simples de iluminação encontram-se os sistemas zenitais. O uso da iluminação através de aberturas zenitais possibilita uma maior uniformidade de distribuição da luz natural em relação à iluminação lateral e, principalmente permite maiores níveis de iluminâncias sobre o plano de trabalho (ABNT, 2005). A Figura 9 apresenta diferentes tipos de sistemas de iluminação simples.

2.3.1.1 Tipos de Iluminação Zenital

Os Tetos Transparentes são elementos que ocupam uma porção do telhado no ambiente. Estão construídos de materiais transparentes ou translúcidos, sendo horizontais ou inclinados. Geralmente são constituídos por placas finas que não apresentam índices de resistência térmica relevantes. Isto pode gerar dois problemas: aquecimento ou esfriamento excessivo do ambiente (VIANNA e GONÇALVES, 2004).

Os Domos são aberturas predominantemente horizontais, compostas por materiais translúcidos, parcialmente opacos ou perfurados. No período de verão, quando os ângulos das alturas solares são maiores, existe um aumento da incidência de irradiação solar direta neste tipo de sistema com aberturas e superfícies predominantemente horizontais, podendo gerar efeitos indesejados nos aspectos térmicos do ambiente e desconforto visual para o usuário (LECHNER, 2001).

As claraboias são elementos verticais ou inclinados, que de modo geral trabalham com a captação e redirecionamento da irradiação solar (CABUS, 1997). O melhor desempenho desses elementos é encontrado em edifícios de um pavimento e baixa altura (LECHNER, 2001).

O monitor é uma seção elevada do telhado. Consiste de uma cumeeira com aberturas verticais, sendo geralmente seu comprimento semelhante ao do ambiente interno (CABUS, 1997). É preferível que a orientação da abertura deste sistema seja projetada segundo a latitude e o hemisfério (Norte ou Sul) para proteger de modo simples, da incidência de irradiação solar direta.

O dente-de-serra ou *shedé* um sistema de abertura zenital, paralelas e sucessivas, verticais ou inclinadas com cobertura inclinada na orientação oposta, com o fim de dirigir a luz ao interior do ambiente (CABUS, 1997). Este tipo de sistema é utilizado para captação de iluminação difusa para amplos espaços com grandes vãos, coletivos ou industriais (BAKER, STEEMERS, 2002).

O lanternim apresenta-se como um elemento relevante na configuração volumétrica do telhado projetado, geralmente na parte mais elevada. Consiste numa elevação deste, com aberturas verticais para a entrada de luz (LECHNER, 2001).

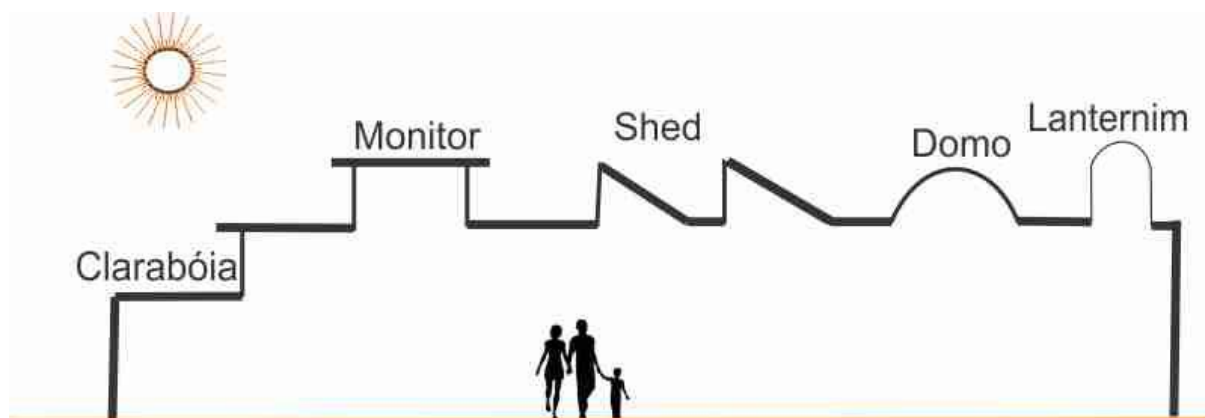


Figura 9. Diferentes tipos de aberturas zenitais horizontais e verticais.

Fonte: Adaptado de Lechner, 2001

2.3.2 Sistemas Avançados

Os sistemas avançados de iluminação natural surgem como um meio para reduzir os efeitos negativos da iluminação natural e melhorar o desempenho dos edifícios em termos de aproveitamento da luz natural e eficiência energética (IEA, 2000).

Segundo Littlefair (1996) os sistemas avançados de iluminação baseiam seu funcionamento em dois conceitos principais: primeiro, aproveitar o potencial luminoso do brilho da luz do sol; e segundo, a possibilidade de redirecionar o fluxo luminoso de acordo com a necessidade do ambiente.

Os sistemas avançados de iluminação natural proporcionam níveis mais elevados de luz natural e, simultaneamente, obtêm um maior controle da entrada de irradiação solar direta (WITTKOPF, 2007; PICCOLO; PENNISI; SIMONE, 2009). Os principais objetivos destes sistemas são: redirecionar a luz natural para as zonas pouco iluminadas (tanto para aumentar o nível de iluminação nessas zonas, como para reduzir as diferenças de níveis entre as distintas zonas de um espaço); melhorar a iluminação natural nas zonas de trabalho; evitar ou reduzir a ocorrência de encadeamento; melhorar o conforto visual dos habitantes e obter sombreamento solar e conforto térmico (PALMA, 2009).

Existem diversas formas de classificar os sistemas avançados de iluminação natural. De acordo com a sua geometria podem-se classificar em sistemas refletores, sistemas integrados em envidraçados e sistemas de transporte de luz (PALMA, 2009). Diversos estudos têm desenvolvido uma revisão e análise dos principais sistemas de iluminação natural, baseados na classificação da publicação do IEA Task 21 (2000) de sistemas com sombreamento e sem sombreamento (KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002; PALMA, 2009; SAITER, 2005).

Os elementos refletores podem estar no interior ou exterior das edificações. Estes sistemas abrangem: as palas refletoras, estores anidólicos, sistemas de sombreamento anidólicos e sistemas anidólicos de redirecionamento de luz.

Os sistemas integrados em envidraçados são: os vidros prismáticos, estores de lamelas, Laser-CutPanel (LCP) e Channel Panel, vidro para reorientação de luz, elementos ópticos holográficos (EOH) e vidros eletrocromicos (IEA, 2000; PALMA, 2009).

Os sistemas de orientação de luz são: heliostatos, painéis coletores, fibras ópticas e os sistemas de tubos e dutos horizontais e verticais de transporte de luz.

As tecnologias ópticas de iluminação natural de transporte de luz podem direcionar luz para os espaços mais distantes no interior de um edifício onde a luz do dia é limitada (KIM; KIM, 2010b). Os sistemas de iluminação natural ópticos baseiam-se principalmente na fonte de luz solar direta. A luz solar direta é redirecionada para o interior do edifício por uma série de espelhos, fibras ópticas, tubos ou ductos reflexivos (KIM; KIM, 2010b).

Devido ao desenvolvimento de novos materiais, estes sistemas tornam-se cada vez mais simples e baratos (AL-MARWAEI; CARTER, 2006; KIM; KIM, 2010b). A figura 10 apresenta diferentes tipos de sistemas avançados de iluminação natural.

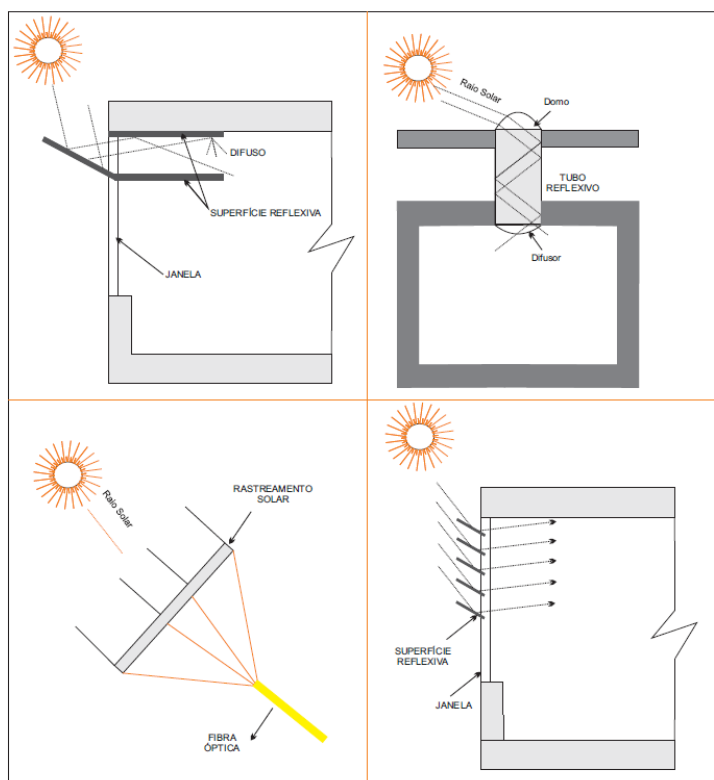


Figura 10. Diferentes tipos de sistemas avançados de iluminação natural.
Fonte: adaptado de Pelegrini (2009)

2.4 O DUTO DE LUZ SOLAR

Os dutos de luz ou TDGS (*Tubular Daylight Guidance System*) são dispositivos lineares que conduzem a luz do dia ao interior dos edifícios, mediante tubos guias altamente refletivos (AL-MARWAEI; CARTER, 2006). A função deste sistema está baseada no princípio de multirreflexões em superfícies especulares (MOHELNIKOVA, 2009).

Os tubos de luz captam a luz natural proveniente do céu através de um coletor na parte superior, transportando-a por uma série de reflexões especulares e difusas através de um canal, até atingir o nível do teto. Este sistema permite dirigir ou redirecionar a luz do dia ao interior dos ambientes (KIM; KIM, 2010b).

Os dutos de luz estão constituídos por quatro partes fundamentais: (a) sistemas de coleta da luz; (b) um espelho parabólico que redireciona a luz solar, otimizando a sua captação de acordo com a posição do Sol no céu; (c) sistema de transmissão e distribuição

da luz; (d) sistema de emissão de luz (Figura 11). Observa-se que a opção b varia de acordo com as diferentes configurações e propostas do produto.

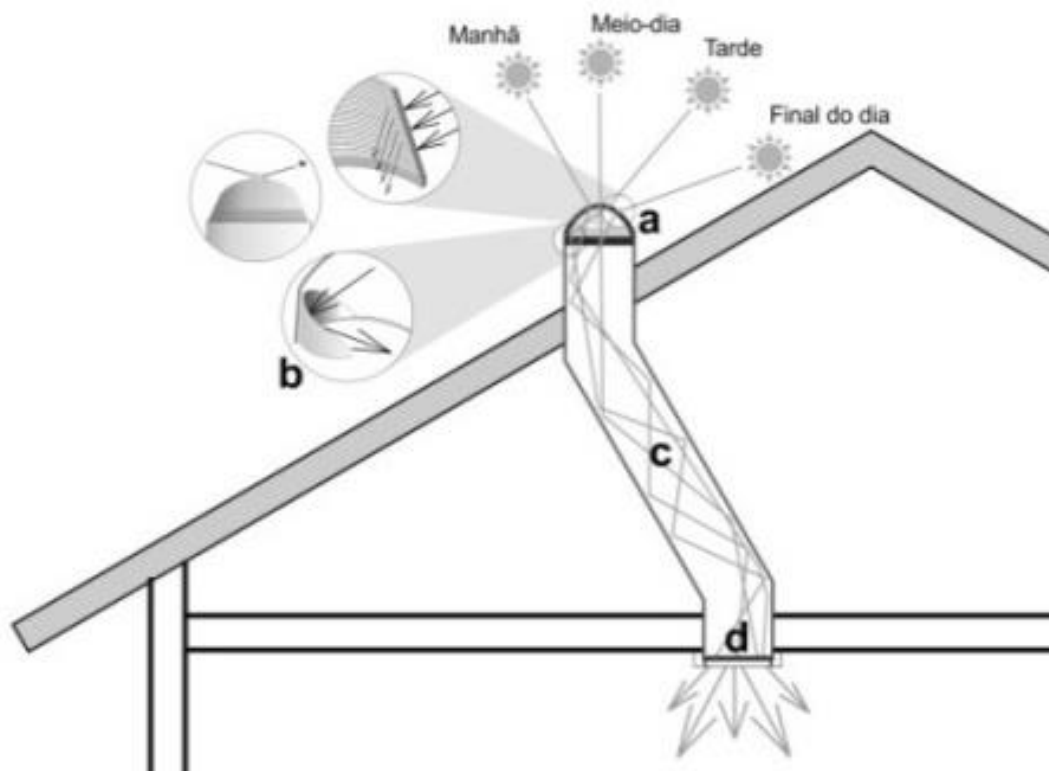


Figura 11. Componentes dos tubos de luz solar.

Fonte: reproduzido com permissão de TOLEDO; BUSCH; PELEGRINI (2012)

A eficiência de transmissão de luz de cada um destes componentes é fundamental para determinar o bom desempenho deste sistema (VERSO; PELLEGRINO; SERRA, 2011). Como alternativa é possível encerrar a entrada de luz natural através de um sistema mecânico acionado através de um interruptor (MAYHOUB; CARTER, 2012).

Estes sistemas podem estar unidos com o sistema de iluminação elétrica mediante controles para ativar a luz quando é necessário, neste caso sendo um sistema híbrido. Ante a ausência de luz solar direta ou horários noturnos entra em ação um sistema artificial (MAYHOUB e CARTER, 2012).

Atualmente existem produtos no mercado internacional que oferecem sistemas híbridos de tubos solares, como o caso do tubo solar híbrido da empresa CHATRON (figura 12), este sistema funciona como um tubo solar standard durante o dia, mas quando começa a ficar escuro, um pequeno painel fotovoltaico localizado ao lado do coletor, deixa de carregar a sua bateria e se acendem as lâmpadas LED localizadas ao lado do difusor (CHATRON, 2012).

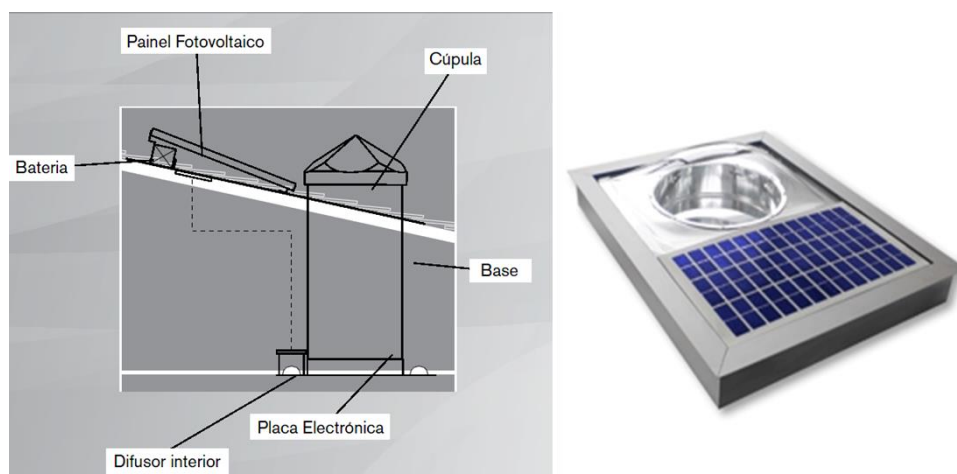


Figura 12. Sistema Híbrido de tubo solar com painel fotovoltaico.
Fonte: adaptado de CHATRON (2012)

2.4.1 Eficiência e desempenho dos Tubos de luz solar

Pattini; Mitchell; Ferrón (2003) desenvolveram luminodutos de baixo custo na Argentina em escala 1:1, foram estes dutos instalados numa casa bioclimática, o tubo de luz apresentou materiais de baixo custo. Para as simulações do desempenho do tubo foi utilizado o software Isolux.

Comprovou-se que a partir do uso do tubo pode-se atingir uma boa distribuição das iluminâncias no interior dos ambientes e melhorar o nível da iluminação nos quartos, cumprindo com as normas de iluminação exigidas; para realização de atividades domésticas.

Souza (2005), desenvolveu diferentes dutos de luz em escala 1:10 para avaliar o desempenho dos dutos e avaliar modelos matemáticos para a contribuição desses sistemas nas condições do céu de São Carlos - SP (Brasil).

Souza (2005) obteve como resultado que os dutos de luz proporcionam uma melhoria na distribuição e nos níveis das iluminâncias no ambiente interno. O duto de luz cria a possibilidade de diminuir a área da janela sem prejudicar a iluminação nas áreas mais distantes da abertura. Para diminuir o ofuscamento causado nos pontos próximos à janela, os dutos de luz ajudam a suprimir a necessidade de pontos de luz artificial nas partes mais profundas do ambiente.

O estudo de Soto (2010) avaliou a capacidade de admissão e distribuição de luz natural por meio de dutos de luz com o fim de gerar ambientes bem iluminados em habitações populares. Obteve-se como resultado que pode-se atingir uma economia de 38% no relativo ao custo econômico da energia utilizada em iluminação artificial para os dias simulados, além de uma possível melhoria na qualidade ambiental das habitações de baixa renda.

Kim e Kim (2010b) desenvolveram um experimento com a configuração de um tubo de luz, a escala real, 1:1, para avaliar o desempenho do tubo de luz. O estudo mostra que o sistema fornece suficiente luz nas condições de céu claro e luz direta e também fornece uma quantidade significativa de luz sob condições de céu nublado.

Kocifaj (2009) desenvolveu simulações para avaliar o desempenho do uso de dois elementos ópticos num tubo de luz, um dos elementos ópticos foi um difusor lambertiano e o

outro foi o vidro transparente. Este estudo mostra que os tubos de luz tem melhor desempenho quando integram diferentes elementos ópticos nos seus componente, assim, pode se atingir uma melhor distribuição da iluminância interior nos ambientes.

Mohelnikova (2009) desenvolveu um modelotubo solar, em escala 1:1, para determinar a eficiência de entrega de luz, tomando em consideração as refletâncias e transmitâncias dos elementos e os seus materiais. Este estudo mostra que a maior contribuição deste sistema é entregar luz natural às áreas mais profundas e pouco iluminadas dos edifícios e melhorar significativamente o conforto visual das pessoas.

Li et al (2010) desenvolveram um estudo no Hong Kong para determinar a eficiência do tubo de luz, 10 tubos de luz foram instalados no teto de um corredor; os resultados da análise evidenciam que o sistema ao estar integrado com controles de iluminação adequados podem reduzir substancialmente o consumo de energia de iluminação. Segundo os autores, as poupanças de energia dependem diretamente da disponibilidade da luz externa do céu.

Usando controles *on-off* e *dimmers*, o gasto de energia representou respectivamente 54% e 42% da energia consumida sem nenhum tubo instalado, demonstrando isto a grande capacidade de economia elétrica do sistema.

Mayhoub e Carter (2011) analisaram o *payback* (retorno do investimento) de diversos sistemas híbridos de iluminação. O tubo de luz híbrido unido ao sistema de iluminação elétrica, em comparação com outros sistemas híbridos, têm baixo custo de investimento, devido à sua dependência de sistemas ópticos simples e baratos que utilizam baixas concentrações de luz solar. O retorno deste investimento em relação à economia de energia é ainda longo. O *payback* calculado, em relação aos preços de energia elétrica da Europa, foi de aproximadamente 4 a 6 anos.

Mayhoub e Carter (2012) realizaram um estudo comparando a poupança de energia de sistemas híbridos de iluminação natural em diferentes localidades do mundo, o sistema de tubos solares apresenta um melhor desempenho em relação à poupança energética, apesar de não possuir uma tecnologia sofisticada. A figura 13 mostra a comparação de porcentagem de economia dos diferentes sistemas híbridos, os TDG (barra em cor verde) são os tubos solares.

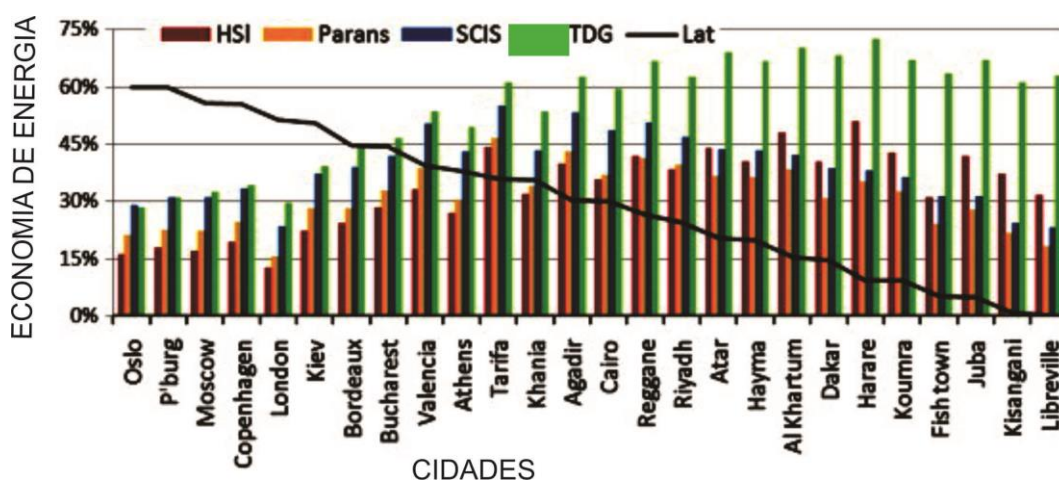


Figura 13. Comparação da porcentagem de economia de energia de diversos sistemas de iluminação natural.

Fonte: adaptado de Mayhoub e Carter (2012)

Em termos de conforto visual, as vantagens oferecidas pelos tubos de luz são evidentes: os valores das iluminâncias sobre os planos de trabalho e nas zonas mais profundas dos ambientes têm mostrado uma correta distribuição e uniformidade para obter conforto lumínico e para prevenir e reduzir a fadiga visual. Pode-se economizar energia tanto elétrica, como reduzir a energia utilizada para esfriar ambientes, porque este sistema reduz a irradiação direta e evita o sobreaquecimento.

2.4.2 Parâmetros de Configuração do Duto Solar

Existem diferentes parâmetros a serem considerados para realizar a configuração dos dutos de luz solar. Estes parâmetros podem ser ambientais, como as condições do céu, componente solar, altura solar e latitude. Também devem ser considerados parâmetros relacionados à geometria e características do duto como: longitude e diâmetro do tubo, refletâncias e transmitâncias dos materiais, ângulos de inclinação, o tipo de coletor e difusor e elementos ópticos de redirecionamento de luz.

2.4.2.1 Parâmetros Ambientais

O comportamento do duto varia em relação à trajetória do sol, latitude do local e condições de céu. O tipo de céu adotado nas simulações determina o intervalo de tempo em que o sistema conferirá iluminação suficiente no ambiente (SOTO, 2010). O quadro 2 mostra um resumo com as principais características para cada um dos parâmetros ambientais, de acordo com os resultados dos trabalhos analisados da literatura.

Parâmetro	Característica
Tipo de céu	Em condições de céu encoberto o tubo de luz solar apresenta menor desempenho. Para o céu parcialmente nublado, a eficiência é melhor. A maior eficiência é para os dias de céu limpo com luz solar direta.
Latitude	Tubos instalados em localidades próximas à latitude 0°, apresentam os melhores desempenhos (maiores alturas solares e índices de irradiação).
Estações do ano	Melhor desempenho lumínico nas estações de verão e primavera. No inverno este desempenho diminui consideravelmente.

Quadro 2. Influência dos parâmetros ambientais para o desempenho dos dutos de luz solar
Fonte: Adaptado de Souza (2005); Paroncini (2007); Soto (2010) Mayhoub e Carter (2012)

2.4.2.2 Parâmetros geométricos

O quadro 3 mostra um resumo com as principais características para cada um dos parâmetros geométricos, de acordo com os resultados dos trabalhos analisados da literatura técnica internacional.

Parâmetro	Característica
Longitude e diâmetro do tubo	Os níveis de iluminação estão relacionados à altura do duto. O duto com menor longitude não produz tantas perdas por reflexões ao interior do duto. A relação diâmetro/ comprimento é um fator importante no desempenho final do sistema
Propiedades ópticas	As propriedades ópticas dos materiais influenciam no desempenho final do sistema
Coletor e difusor	O coletor em forma de domo mostra melhor desempenho principalmente nas primeiras horas do dia. Pode-se melhorar a eficiência usando elementos ópticos para redirecionar a luz
Refletâncias interiores dos tubos	A maior refletividade interna do sistema de transporte de luz, maior é o desempenho do tubo de luz solar; podem se fazer simulações com diferentes refletâncias para determinar esta eficiência.
Tubos Retos e o Efeito da Utilização dos cotovelos	Em localidades geográficas distantes da linha do Equador, os raios solares não entram diretamente nos tubos e por tanto não é tão necessário usar ângulos nos tubos. A eficiência de transmissão de luz torna-se mais elevado se o limite superior do tubo é ligeiramente desviado com direção ao sol. A utilização destes elementos gera um fator de perda nas iluminâncias finais emitidas, porque os ângulos gerados aumentam o número das reflexões ao interior do duto.

Quadro 3. Influência dos parâmetros geométricos para o desempenho dos dutos de luz solar
 Fonte: Adaptado de Mohelnikova (2009); Kocifaj et al (2012); Komar e Darula (2012); Kim e Kim (2010b); Xifra e Evans (2002)

Pode-se determinar que a eficiência de transmissão de luz (LTE) depende da geometria e dos parâmetros ópticos do sistema, como também das condições e características dos diferentes tipos de céu.

2.4.3 Metodologias de avaliação do desempenho de dutos de luz.

2.4.3.1 Ferramentas de Simulação

No âmbito internacional foram utilizados para simular o desempenho dos tubos de luz, como de cada um dos seus componentes, diferentes softwares como o Radiance, Sky Vision, OPTIcad, ROOF_v3, Photopia, Holigim e Matlab.

Jin et al (2013) utilizaram os programas Radiance e Photopia para comparar o desempenho de um sistema de tubo de luz e um concentrador solar com fibra óptica. O Photopia foi utilizado para modelar fotometricamente os sistemas de iluminação natural como a luz que viaja através de sistemas altamente reflexivos. A distribuição das curvas de energia de candela (CDCs) gerados por Photopia foram importados pelo Radiance para produzir dados fotométricos e imagens de diferentes locais da sala de aula simulada.

Kocifaj (2009) usou o ROOF_v3 para avaliar o desempenho de dois elementos ópticos num tubo de luz solar: O difusor Lambertiano e o vidro transparente. As distribuições das iluminâncias nos dois componentes ópticos e o plano de trabalho situado por baixo do tubo foram calculados simultaneamente. Como dados de saída se obtiveram os mapas de iluminâncias (isolinhas) e o fluxo luminoso sobre o plano de trabalho e a interface óptica.

Kocifaj et al (2012) utilizaram o software HOLIGILM para determinar a influência do uso de cotovelos na eficiência de transmissão de luz nos tubos solares. Com o uso deste programa permitiu-se determinar a eficiência de transmissão de luz sob múltiplas condições de luz exterior e de céu.

No âmbito nacional existem outros softwares que já foram testados para analisar a iluminação natural. Como é o caso do Apolux, que utiliza o método da radiosidade, e o TropLux, que utiliza o método do raio traçado (Aragão, 2011).

O TropLux (TROPLUX, 2011) é um programa de simulação computacional que permite a avaliação de iluminação natural. Este programa propõe-se a simular o desempenho da iluminação natural, com particular atenção para as características climáticas e arquitetônicas de zonas tropicais. Esta característica apresenta-se como uma vantagem, porque permite a simulação dos ambientes sob condições de céus com variada distribuição de iluminâncias.

O TropLux se baseia nos conceitos do método Monte Carlo, do método do raio traçado e de coeficientes de luz natural. Para o cálculo das componentes refletidas externa e interna, o TropLux utiliza a subdivisão de céu proposta pela CIE (*Comission Internationale de L'Eclairage*), que o divide em 145 partes, e utiliza uma subdivisão mais refinada com 5221 partes, para melhorar a precisão dos resultados em função do tamanho angular do sol, para o cálculo da componente direta (CABÚS, 2005).

O programa facilita a configuração de valores de refletâncias e características dos materiais utilizados nas superfícies do quarto e do duto, sejam estas especulares ou difusas, também apresenta características de transmitância dos materiais que compõem os planos coletor e difusor do sistema (SOTO, 2010).

Segundo Correia (2008), o TropLux comprova ser a melhor opção para a realização de estudos de simulação da iluminação natural por dar como resultado iluminâncias mais próximas dos dados medidos com luxímetros na realidade. O programa permite simular simultaneamente datas, horas, orientações e tipos de céu classificados pela CIE, possibilitando também a modelagem de geometrias complexas (CORREIA, 2008).

Soto (2010) utilizou o software Troplux, para avaliar o desempenho de três configurações de tubos solares, em três diferentes latitudes e com duas refletâncias internas diferentes para cada tubo. Os resultados foram analisados baseados na distribuição horaria das iluminâncias e desempenho segundo dia analisado, a variação de desempenho luminoso segundo tipos de céu, a distribuição de iluminâncias no plano de trabalho e a distribuição de iluminâncias nos eixos característicos da sala.

2.4.4 Materiais dos dutos solares

2.4.4.1 Características de dutos de Empresas Internacionais

O desenvolvimento de novos materiais com alta refletância especular, tem conduzido à melhora na configuração de sistemas de tubos de luz solar, o tipo comercialmente bem sucedido de tubos de orientação de luz natural em muitas partes do mundo (AL-MARWAE E CARTER, 2006).

Existe uma grande variedade de dutos solares disponíveis no mercado, sendo a tecnologia destes produtos um fator importante para a avaliação do seu desempenho e aumentar a variedade de aplicação nos edifícios (KIM e KIM, 2010).

A quadro 1 mostra as distintas características dos materiais das empresas internacionais que comercializam os dutos solares. Os principais exemplos de aplicação dos dutos de luz pertencem à empresa Solatube, produtos importados e comercializados no Brasil através de empresas oficiais como Naturalux (2012a), Efilux (2012) e Solalux (2012). Outro exemplo é a empresa espanhola Espacio Solar, que importa seus produtos para o Brasil, sendo um de seus principais mercados em Latinoamérica, também dentro do mercado encontra-se a empresa portuguesa Chatron que importa seus produtos para este país.

COMPONENTE	MATERIAIS – CARACTERÍSTICAS		
	SOLATUBE	ESPACIO SOLAR	CHATRON
Captador de luz	Tecnologia Raybender®3000 25 % de redução no calor transmitido Material retransmissor no captador	Cristal duplo resistente aos impactos. Material de fácil manutenção;	Metacrilato de alto impacto, material robusto que filtra raios UV (até 380 nm). Anti-aderência de partículas de poeiras. Não precisa manutenção
Tubo - Exterior	Alumínio	Alumínio	Alumínio
Revestimento Interior do tubo	material reflexivo de 99.7%, Spectralight® Infinity	Tubo altamente Refletivo, DEPLO-DUCT	Interior do tubo revestido com chapa de alumínio TS-V98100. Refletância superior a 99 %.
Material retransmissor no captador de luz	Refletor LightTracker™ 99.7% de refletividade, que aumenta a área de captura de luz em 15%.	Malha DEPLOCCELL no coletor. Vidro-Cristal. A rede reflexiva DEPLOCCELL® - dispositivo patenteado que desvia os raios de sol ao interior do conducto. Refletância de 98 %. (Duplica o rendimento).	
Difusor	Material OptiView, lente Fresnel. A lente Fresnel que concentra a iluminação. Difusor Vusion: lente prismática. A lente prismática, que difunde a iluminação de forma mais homogênea. Alternativa de Dimmer	Cristal duplo Alternativa de dimmer. Controle de intensidade de luz	Polycarbonato. Maioria de modelos de difusores unidos a luminárias LED para iluminação mista.

Quadro 4. Características de tubos solares de diferentes empresas internacionais
Fonte: Adaptado de Naturalux (2012b); CHATRON (2012) e ESPACIO SOLAR (2012)

2.4.5.2 Características de dutos desenvolvidos e testados em Experimentos

O quadro 4 mostra as características dos dutos de luz solar que foram desenvolvidos e testados em diferentes estudos e experimentos, na literatura técnica internacional. Este

quadro sintetiza as características das três partes principais que compõem os sistemas de luz.

Autores	COMPONENTE		
	Captador de Luz	Sistema de transporte de luz	Difusor
Pattini; Mitchell; Ferrón (2003)	Coletor: Cortado a 45º, plexiglas com filtro UV	Exterior: PVC Interior: Película de poliéster metalizado (refletância de 0.9) Relação diâmetro: comprimento 1:4	Disco Difusor de Poliacryl vinilo.
Paroncini; Calcagni; Corvaro (2007)	Forma de domo com proteção UV e resistente a impactos, proteção de poeira e condições climáticas. Dispositivo óptico para capturar e redirecionar a luz	Interior: Lâmina de alumínio com refletividade de mais de 99%. Relação diâmetro: comprimento 1:4	Policarbonato micro – corrugado de forma convexa.
	Tubo Solar existente no mercado italiano		
Mohelnikova (2009)	Forma de cúpula	Tubo com elevada refletância (r = 0,96).	difusor transparente.
Kim e Kim (2010)	Acrílico, com 99% de transmitância, tem um dispositivo óptico para redirecionar a luz.	O tubode película dealumínio, revestida internamente de materialfinoprismático. Relação diâmetro: comprimento 1:4	Acrílico
Baroncini et al (2010)	Coletor de policarbonato em forma de domo.	Tem dois tubos, O Tubo interno lâmina de alumínio internamente e extarnamente forrada com:3 M Radiant Mirror Film, refletividade: 99,5 % OTubo externo: Tubo transparente de Policarbonato 6 mm de espessura e transmitância óptica de 89 %.	Difusor convexo de policarbonato.
	Experimento Especial: Tubo duplo		

Quadro 5. Características de tubos solares testados em diversos experimentos.
Fonte: Adaptado de Paroncini; Calcagni; Corvaro (2007); Mohelnikova (2009); Kim e Kim (2010); Baroncini et al (2010).

2.4.5 Exemplos de Aplicação de Dutos Solares no Brasil

No Brasil, apesar das condições climáticas favoráveis, o uso dos dutos de luz solar, não está amplamente difundido, embora nos últimos anos o uso destes sistemas tem aumentado. Entretanto, os sistemas avançados de iluminação natural encontrados no

mercado nacional têm preços elevados devido ao fato de que na sua maioria, estes produtos são importados.

O Brasil possui uma das abóbadas celestes mais claras do mundo. Na maior parte do território, a nebulosidade é reduzida em comparação com outros países, evidenciando isto o enorme potencial de racionalização energética que a luz natural representa (KRAUSE, 2002).

Apesar de que os uso e instalação dos sistemas de dutos de luz solar solares têm aumentado no Brasil, ainda existem poucos estudos sobre a economia de energia, relação custo-benefício, benefícios fisiológicos ou sobre os benefícios deste sistema para atingir e melhorar o conforto lumínico nas edificações, dentro do contexto brasileiro.

Uma das poucas pesquisas realizadas sobre a economia de energia foi desenvolvida pela Light (Companhia de Energia Elétrica, 2011) através do Programa de Eficiência Energética (PEE) e os resultados sobre custo-benefício e economia de Energia foram apresentados à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

O estudo foi desenvolvido nas instalações do Ginásio de Esportes Ilha de São João, da Prefeitura de Volta Redonda, município do estado do Rio de Janeiro. Neste ginásio foram instalados dutos de luz (figura 16), com um investimento total de R\$ 262 mil, em conjunto com luminárias mais eficientes, para modernizar e melhorar a iluminação (LIGHT, 2011).

Os resultados e benefícios obtidos estão resumidos na Tabela 6. O parâmetro numérico 0,8 na Tabela 6 representa uma referência da relação custo-benefício especificada pela ANEEL (ANEEL, 2008). Como evidenciado foi atingida uma economia de 86%, foi reduzido o ofuscamento e diminuída a transmissão de calor (LIGHT, 2011).

Tabela 6. Benefícios obtidos através da instalação de tubos solares no Ginásio de Esportes Ilha de São João.

Parâmetros	Benefício Obtido
Efeitos negativos da Iluminação Natural	Redução de Ofuscamento
Transmissão de calor	25 % menos transmissão de calor
Consumo de Energia	86% menor consumo de energia Economia de 241, 98 MWh/ano Consumo de R\$50 000 anualmente (valor baseado em cálculos de 2011)
Redução da demanda de energia - iluminação nas horas ponta	29,99 kW
Iluminância	Melhor distribuição das iluminâncias
Qualidade da iluminação Interior	Maior estabilidade e menor variação da luz interior ao longo do dia
Relação custo-benefício (RCB) ANEEL parâmetro (0,8)	0,58, efeito maior do que o índice da ANEEL, cumpre e supera o parâmetro da ANEEL.
Payback	Aproximadamente 5 anos

Fonte: Adaptado de Toledo; Busch; Pelegrini (2012).

Devido aos benefícios obtidos com o sistema de tubos, no relacionado ao consumo de energia elétrica, a prefeitura de Volta Redonda implementará mais tubos de luz em outras edificações de Volta Redonda (LIGHT, 2011). Esta ação evidencia que o investimento em estudos e pesquisas na área de sistemas avançados de iluminação natural pode contribuir para a implementação destas tecnologias em edifícios e projetos no Brasil.



Figura14. Tubos de luz instalados no estádio da prefeitura de Volta Redonda.

Fonte: (LIGHT, 2011)

No Brasil, está presente também a empresa Comfort Lux, instalada em Porto Alegre, com cinco anos de presença no mercado, que comercializa dutos de luz simples de seção quadrada. Esta empresa não comercializa produtos importados, sendo que estes dutos são desenvolvidos no Brasil (COMFORTLUX, 2013). Estes equipamentos estão compostos por lentes especiais em acrílico prismático e possuem baixo peso próprio.

2.5 Cálculo do consumo de energia e payback em sistemas de iluminação natural

2.5.1 Cálculo da Economia de Energia

Souza (2003) propôs uma metodologia para estimar o Potencial de Aproveitamento da Luz Natural (PALN) através da utilização de sistemas automáticos de controle de luz, o PALN serve para estimar a quantidade de energia economizada com a utilização da luz natural, para complementar ou substituir o sistema de luz artificial.

Este método é dado mediante o período em que a luz natural é suficiente para atender as necessidades da tarefa a ser realizada num local. Para calcular o PALN é

necessário estabelecer o período no qual a luz natural poderá substituir ou complementar a luz artificial, de acordo com a equação 2:

$$PALN = PALN_s + PALN_c \quad 2$$

Onde:

PALN é o percentual de aproveitamento da luz natural [%];

PALN_s é o percentual de aproveitamento da luz natural por substituição da iluminação artificial [%];

PALN_c é o percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação artificial [%].

Com a equação 3 se pode obter o PALN_p, que é o percentual de aproveitamento da luz natural ponderado:

$$PALN_p = (PALN_{cc} \cdot \rho_{cc}) + (PALN_{cp} \cdot \rho_{cp}) + (PALN_{ce} \cdot \rho_{ce}) \quad 3$$

Onde:

PALN_p é o percentual de aproveitamento da luz natural ponderado [%];

PALN_{cc} é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu claro [%];

PALN_{cp} é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu parcialmente encoberto [%];

PALN_{ce} é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu encoberto [%];

ρ_{cc} é a probabilidade de ocorrência de céu claro [adimensional];

ρ_{cp} é a probabilidade de ocorrência de céu parcialmente encoberto [adimensional];

ρ_{ce} é a probabilidade de ocorrência de céu encoberto [adimensional].

2.5.2 Cálculo do Payback

O método WLCC (whole life cycle costing), permite avaliar os custos e benefícios de um sistema, permitindo considerar diversos fatores que influenciam o esquema de iluminação (BOUSSABAIN e KIRKHAM, 2004).

Este método leva em conta os custos de funcionamento de edifícios e componentes durante o tempo de vida útil ou durante algum período de tempo especificado. O “valor tempo” de dinheiro é reconhecido pela utilização do método do valor atual (PV) que compõe e desconta os fluxos da caixa para refletir o aumento do valor do dinheiro quando investido (BOUSSABAIN e KIRKHAM, 2004).

O valor líquido presente (NPV) é uma abordagem utilizada na orçamentação do WLCC, (BOUSSABAIN e KIRKHAM, 2004). O NPV é uma métrica para fazer a medição do valor líquido de um investimento em construção de ativos em dinheiro atual. O NPV é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$NPV = \sum \Delta PV_s + R_0 - [I_{0-DL} + \sum PV_{M-DL} + \sum PV_I] \quad 4$$

Onde o I_{0_DL} é o investimento inicial do sistema de iluminação (R \$), ΔPV_S é o custo total anual de economia sobre o uso de somente o sistema de iluminação elétrico convencional (R \$), o R_0 é o valor residual do sistema de iluminação (R \$), o PV_{M_DL} é o custo anual de manutenção do sistema de iluminação natural (R \$) e o PV_J é o investimento futuro para substituição do sistema (R \$) (MAYHOUB e CARTER, 2011).

2.6 Consumo da Energia e normatividade da iluminação no setor residencial.

A tarifa residencial de energia no Brasil está em linha com as praticadas em economias desenvolvidas da Europa (ABRADEE, 2011). No Brasil, a tarifa residencial de eletricidade para baixa renda é de 300,10 R\$/MWh (reais por quilowatt-hora). O equivalente a 34,97 % do consumo total. Na região Sul, a tarifa do setor de baixa renda é de 293,54 R\$/MWh. O equivalente a 21,51 % (ABRADEE, 2011).

De acordo com a resolução da ANEEL 1565 de 09.07.2013 (COPEL, 2013). Para o setor B1 (Residencial Baixa Renda) a tarifa é de 0,09 R\$/KWh para consumo inferior ou igual a 30 KWh, de 0,15R\$/KWh para consumo entre 31 KWh e 100 KWh e de 0,24 R\$/KWh para consumo entre 101 KWh e 220 KWh (COPEL, 2013), como mostra a tabela 7.

Tabela 7. Tarifas de Luz para o setor residencial – B1

CONVENCIONAL	Resolução ANEEL Nº 1565, de 7 de julho de 2013	
Tarifa em R\$/ kWh	Resolução	Com Impostos:
B1 Residencial Baixa Renda	ANEEL	ICMS e PIS/ COFINS
Consumo mensal inferior ou igual a 30 kWh	0,09224	0,09658
Consumo mensal entre 31 kWh e 100 kWh	0,15813	0,23778
Consumo mensal entre 101 kWh e 220 kWh	0,23719	0,35667
Consumo mensal superior a 220 kWh	0,25698	0,38643

Fonte: (COPEL, 2013)

A nova norma técnica brasileira de iluminação mínima requerida nos ambientes, NBR 8995-ISSO-CIE (2013), estabelece os requisitos para os locais de trabalho internos, para que os usuários desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente (2013). Com relação a iluminação do interior das residências, a diferencia da norma técnica Brasileira NBR 5413 (ABNT, 1992), que foi substituída neste ano; a norma NBR 8995, não especifica a iluminação para os ambientes das residências, mas sim para a realização de tarefas específicas. Neste caso, a tabela 8 mostra a iluminação mínima requerida, que foi organizada de acordo à realização de tarefas semelhantes em ambientes de outras edificações:

Tabela 8. Iluminâncias para a realização de tarefas de acordo à Norma técnica NBR 8995

Ambiente	Iluminâncias (lux)
Salas de Estar, Sala de Jantar	200 lux
Cozinhas	500 lux
Quartos de Dormir	200 lux
Corredores	100 lux
Iluminação de Leitura geral	300 lux
Áreas de uso de computador-zona de leitura	500 lux
Banheiros	200 lux

Fonte: adaptado de ABNT (2013)

2.7 Oportunidade e Diferencial da Pesquisa

Diversos estudos têm desenvolvido e avaliado a eficiência dos tubos de luz, usando softwares, modelos teóricos e medições com instrumentos, como as principais metodologias desenvolvidas para avaliar quantitativamente a configuração e eficácia dos tubos, sendo as principais pesquisas achadas na literatura técnica internacional, e por esta razão em condições ambientais estrangeiras, no caso brasileiro são poucas as pesquisas que estejam direcionadas a desenvolver e testar sistemas avançados de iluminação natural.

No âmbito acadêmico brasileiro, existem poucas pesquisas sobre os sistemas avançados de iluminação natural. Alguns estudos (dissertações de mestrado) desenvolveram e testaram sistemas de iluminação natural no Brasil, especialmente sistemas integrados aos envidraçados, painéis coletores e sistemas de transporte de iluminação através de dutos e tubos de luz natural (SAITER, 2005; SOUZA, 2005; PURIM, 2008; LUZ, 2009; SOTO, 2010;).

Souza (2005), desenvolveu diferentes dutos de luz em escala 1:10 para avaliar e estudar o desempenho dos dutos e adequar modelos matemáticos para serem usados na previsão da contribuição desses sistemas em condições do céu e latitude da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo (Brasil). Na pesquisa de Souza (2010) não foi testado e instalado o tubo numa habitação real, nem foi projetado para ser produzido como um produto manufaturado de baixo custo, por não ser este, o escopo da pesquisa.

Luz (2009), avaliou a eficiência luminosa de diferentes dutos de luz de seção quadrada, em diversas escalas, estes dutos foram avaliados em condições de céu artificial e real, a partir dos resultados obtidos foram propostos modelos preditivos para calcular a eficiência luminosa destes sistemas.

Soto (2010) testou o desempenho de dutos de luz usando o software Troplux, o estudo tinha a finalidade de gerar ambientes em habitações populares bem iluminados, foi considerado a caracterização de ambientes das habitações populares de Maceió e Chile, os modelos simulados foram para 3 distintas latitudes e com duas refletâncias internas

distintas. A avaliação foi feita somente em base a simulações e não foram configurados e testados os tubos em escala reduzida ou real; porque não era este o objetivo do trabalho.

As pesquisas nacionais anteriormente mencionadas consideram as condições ambientais brasileiras, onde diferentes protótipos foram testados, em diferentes cidades. Estes trabalhos propõem modelos matemáticos e preditivos do cálculo da eficiência luminosa, avaliam o desempenho de modelos em escala e em ambientes de simulação. Por ser trabalhos mais focados na área de arquitetura e engenharia civil.

Com base a estes dados, existe uma oportunidade para desenvolver um duto solar de baixo custo e determinar os diversos parâmetros de design e configuração, embora com a limitação, de serem efetuados os experimentos na cidade de Curitiba. Esta pesquisa não foca na determinação de modelos matemáticos a partir dos experimentos. Nesta trabalho o design tem maior importância, e será inserido, nas diversas etapas de desenvolvimento, em adaptações e novas propostas ao protótipo configurado, como também em melhoras ao produto através da customização do sistema de luz, para melhorar a eficiência do duto de luz solar. Finalmente serão dadas em base aos experimentos realizados os parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar.

2.8 Considerações Finais

No presente capítulo apresentou-se inicialmente a revisão das propriedades e características físicas da luz natural, considerando as definições das principais grandezas e princípios físicos da luz natural.

As vantagens e desvantagens da iluminação natural foram mostradas, realçando o potencial de diminuição do consumo de energia e a melhora do conforto visual dos moradores nas edificações. Uma breve revisão dos sistemas de iluminação simples e avançados, foi feita; fazendo uma introdução dos sistemas avançados de iluminação natural os dutos de luz solar.

Os dutos de luz solar têm sido analisados, mostrando o estado atual da arte, considerando os benefícios deste sistema, os parâmetros de design e configuração a serem considerados ao momento de fazer os desenvolvimento do protótipo. As metodologias de avaliação do desempenho destes sistemas, foram revisadas; considerando nesta revisão as simulações, por ser usado neste trabalho como ferramenta de ajuda à configuração do produto.

Também foram analisadas as características dos materiais dos componentes dos dutos de luz; como também o contexto atual destes produtos no Brasil. Mostraram-se finalmente as considerações para o cálculo do consumo de energia economizada e payback dos dutos solares.

Por não ser o foco do trabalho, não tem sido realizada uma revisão e análise ampla das fórmulas para calcular o desempenho dos dutos de luz solar. Os parâmetros para a configuração e design de dutos de luz solar são de maior relevância neste revisão.

Todos estes itens anteriormente descritos e analisados tem como finalidade conhecer e sintetizar os parâmetros de configuração dos dutos solares. Finalmente foi encontrada uma oportunidade de pesquisa, a partir da qual, foi feita a realização do presente trabalho. Com base a esta análise foi determinado que o design terá mais importância e estará inserido nas diversas etapas deste trabalho.

No seguinte capítulo será explicado o método a ser desenvolvido para a presente pesquisa. A coleta de dados e a estratégia de análise para cada uma das fases será detalhada.

CAPÍTULO 3 – MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo apresenta-se os procedimentos metodológicos adotados neste estudo. Inicia-se pela caracterização do problema, seguidamente justifica-se a escolha do método, descrevem-se suas etapas e é explicado as técnicas utilizadas para a coleta de dados, como também a estratégia de análise dos dados obtidos durante a pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SELEÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

O problema abordado nesta pesquisa visa definir quais são os parâmetros de design para a configuração de dutos solares, para a aplicação dessas tecnologias no setor residencial. Atualmente evidencia-se a falta de pesquisas das tecnologias de sistemas avançados de iluminação na área de design, no âmbito brasileiro. Apesar das condições climáticas favoráveis no Brasil para o uso, desenvolvimento e aplicação destas tecnologias (PURIM, 2008).

Como evidenciado nos capítulos anteriores, as tecnologias dos dutos de luz solar estão sendo atualmente importadas, e possuem elevados custos, apesar de possuir, dentro do grupo das tecnologias avançadas de iluminação, o sistema mais simples.

Na base de banco de teses e dissertações da CAPES (2012), foram achados poucos estudos sobre os sistemas avançados de iluminação, durante a realização desta pesquisa. Os estudos encontrados pertencem aos programas e áreas de conhecimento de arquitetura e engenharia civil. Dos estudos encontrados, três abrangiam o tema específico dos dutos de luz solar (SOUZA, 2005; LUZ, 2009; SOTO, 2010).

Souza (2005) fez uma avaliação teórica e experimental do desempenho de dutos solares na cidade de São Carlos. Esta pesquisa contribuiu com fórmulas analíticas para testar o desempenho térmico dos dutos. Luz (2009), analisou o desempenho lumínico de diferentes dutos de luz em escala, para a partir de esta análise propor e validar modelos matemáticos preditivos da eficiência luminosa em dutos de luz solar. No trabalho de Soto (2010) foi avaliada a capacidade de admissão e distribuição de luz natural por meio de dutos de luz com o fim de gerar ambientes bem iluminados em habitações populares. Esta pesquisa foi realizada para determinar o desempenho dos dutos, em base a simulações com distintos parâmetros ambientais e geométricos.

Esta pesquisa procura definir os diferentes parâmetros a serem considerados para a configuração de dutos solares, mediante um estudo que abrange desde a etapa de pre-configuração do produto até a análise pós-instalação desta tecnologia. Nesse sentido, esta pesquisa procura contribuir com a ampliação de conhecimentos dos sistemas dos dutos de luz solar, no âmbito brasileiro, para sua futura aplicação no setor residencial.

Do ponto de vista da abordagem do problema esta pode ser considerada como quantitativa (Silva e Menezes, 2005). Nesta pesquisa se obtêm dados numéricos da avaliação de desempenho luminoso do sistema de tubos de luz solar na etapa de simulação da eficácia dos tubos solares, na etapa de análise do desempenho pós-instalação na casa 1.0 e no cálculo de estimativa de *payback* do sistema proposto.

Esta pesquisa pode ser considerada aplicada, segundo Gil (2010) a pesquisa aplicada busca a aquisição de conhecimentos com vistas à aplicação numa situação específica. Segundo Silva e Menezes (2005), na pesquisa aplicada, os resultados devem

ser aplicados imediatamente na solução de problemas específicos que ocorrem na realidade. No presente estudo a situação específica é a aplicação de uma tecnologia avançada de iluminação, um duto de luz solar, mediante a definição de parâmetros de desenvolvimento destas tecnologias, para o setor residencial.

Esta pesquisa é principalmente caracterizada como experimental que, de acordo com Gil (2010) se caracteriza por um trabalho sistemático, que utiliza conhecimentos que são derivados da pesquisa ou experiência prática com vistas à produção de novos materiais, equipamentos, políticas e comportamentos, ou à instalação ou melhoria de novos sistemas e serviços. Nesta pesquisa foram utilizadas as informações da literatura sobre os parâmetros de design dos tubos solares, em base a isto foram desenvolvidos experimentos para avaliar estes parâmetros e em base a análise dos resultados foram dados os parâmetros para a configuração destas tecnologias no setor residencial.

A pesquisa experimental, segundo Gil (2010), busca submeter os objetos de estudo à influência de variáveis em condições controladas e conhecidas pelo investigador. De acordo com Gil (2010) e Lakatos e Marconi (2003), a pesquisa experimental deve apresentar as seguintes propriedades:

- a) Manipulação: o pesquisador precisa manipular pelo menos uma das características dos elementos estudados;
- b) Controle: o pesquisador precisa introduzir um ou mais controles na situação experimental;
- c) Distribuição aleatória: a designação dos elementos deve ser feita aleatoriamente.

Neste sentido, para este estudo, a pesquisa experimental abrange as etapas de simulação e as etapas de análise pós-instalação do tubo: ao fazer a análise de desempenho do duto mediante diferentes simulações no software Troplux, onde as variáveis de configuração do duto solar para avaliar o desempenho, foram manipuladas. Na etapa pós-instalação foi testado o desempenho do tubo solar em diferentes situações e com diferentes variáveis de iluminação. Em base ao anteriormente explicado esta pesquisa é considerada principalmente de caráter experimental e aplicada.

3.2 VISÃO GERAL DA ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002) o procedimento adotado para a coleta de dados e informações é o elemento mais importante para a identificação de um delineamento de pesquisa. Assim, nas seções descritas a seguir serão apresentados detalhadamente os procedimentos de coleta de informações e dados submetidos ao método de pesquisa escolhido para a condução do presente estudo. Esta pesquisa está principalmente dividida em duas fases: A revisão bibliográfica e a pesquisa experimental.

Para a revisão bibliográfica foram abrangidos os temas da iluminação natural, o estado da arte das tecnologias dos dutos de luz solar, os parâmetros de configuração e avaliação do desempenho dos dutos solares e a análise da viabilidade econômica destes sistemas. Nesta revisão foram incluídos livros, teses e dissertações, normas técnicas de iluminação e principalmente artigos científicos de periódicos e eventos reconhecidos nas áreas de ambiente construído e energia solar.

Foram utilizadas banco de dados eletrônicos da *Science Direct*, Scielo e Scopus, sendo os principais periódicos acessados: *Applied Energy*, *Renewable Energy*, *Building and Environment*, *Energy Policy* e *Solar Energy*.

A segunda fase corresponde a fase experimental deste estudo, esta fase tem duas etapas: as simulações pre-configuração do duto de luz solar e a configuração e avaliação pós-instalação do protótipo, para finalmente analisar estes resultados e definir os parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar. A figura 15 ilustra o processo da metodologia utilizada nesta pesquisa

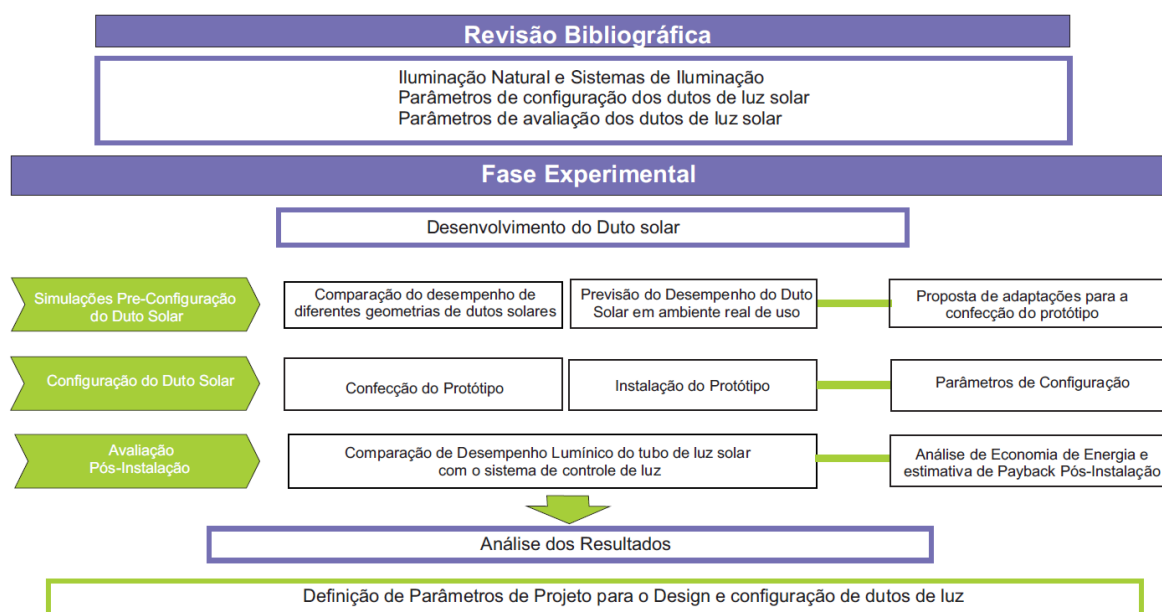


Figura15. Fases do desenvolvimento da pesquisa.

Fonte: (A autora, 2012)

A primeira etapa, abrange as seguintes sub-etapas: As simulações realizadas na pré-configuração do duto solar, a configuração, instalação e a avaliação pós-instalação do protótipo do duto de luz solar.

A etapa de simulações serve principalmente para avaliar diferentes variáveis de parâmetros de configuração, buscando conhecer como estas variáveis influenciam o desempenho do produto. Para esta etapa de simulações são utilizadas as seguintes sub-etapas: A comparação do desempenho de diferentes geometrias de tubos solares e a previsão do desempenho do duto solar em ambiente real de uso. Com base a esta coleta de dados, pode ser feita a proposta final de parâmetros para a configuração do protótipo na seguinte fase.

A etapa de configuração e avaliação pós-instalação do duto de luz solar, tem como objetivo configurar o produto e analisar o payback do sistema considerando os parâmetros da etapa anterior; como também realizar a avaliação pós-instalação do desempenho sob diferentes variáveis de iluminação. As sub-etapas utilizadas são: A confecção e a instalação do protótipo, a comparação do desempenho de diferentes dispositivos de difusão e controle de luz e a estimativa da economia de energia e payback da tecnologia proposta.

Finalmente foi desenvolvida a etapa de análise dos resultados, onde foram definidos, com base a cada uma das etapas anteriormente explicadas, todos os parâmetros de design

a serem considerados para a configuração de tubos de luz solar. A seguir serão detalhados todos os procedimentos anteriormente descritos.

3.3 TÉCNICAS DE PESQUISA (Coleta de Dados)

3.3.1 Simulações pré-configuração do duto de luz solar

A seguir serão detalhadas, as técnicas utilizadas para a realização destas simulações. Esta etapa tem como objetivo determinar os parâmetros de configuração do tubo de luz solar a ser desenvolvido na seguinte etapa. Para isto são avaliadas diferentes variáveis que influenciam o desempenho do duto de sol. A Figura 16 mostra as etapas envolvidas nesta fase, como a coleta de dados a serem usadas.

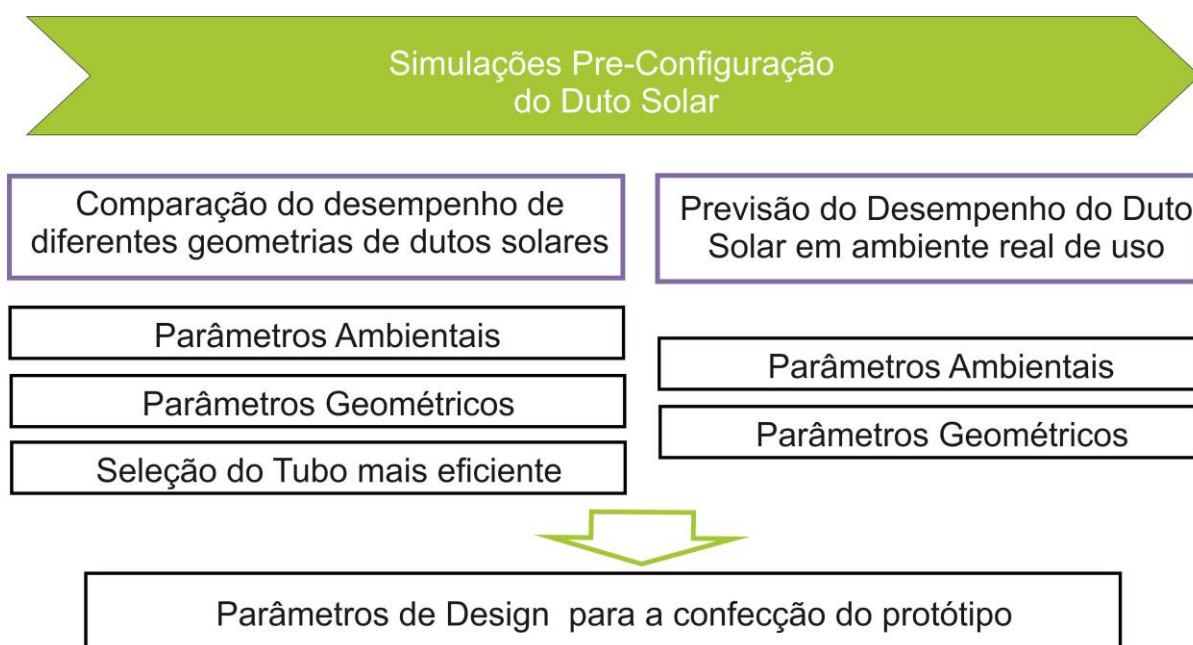


Figura 16. Etapas e coleta de dados envolvidos nas simulações da pré-configuração do duto solar

3.3.1.1 Seleção de Ferramenta de Simulação

Como ferramenta computacional para fazer a simulação do desempenho dos tubos de luz testados foi utilizado o software Troplux. A razão principal é porque este software permite a construção dos protótipos e a simulação com diferentes condições de céu e luz de dia, além disso o programa facilita a configuração de valores de refletâncias e características dos materiais utilizados nas superfícies dos ambientes e do duto, tanto especulares como difusas (CABÚS, 2005).

Segundo Cabús (2005), este programa propõe simular o desempenho da iluminação natural, dando atenção para as características climáticas e arquitetônicas de zonas tropicais. Esta característica permite a simulação dos ambientes sob condições de céus com variada

distribuição de iluminâncias, adotando padrões definidos pela CIE (*Comissão Internacional da Iluminação*).

O TropiLux se baseia nos conceitos do método Monte Carlo, do método do raio traçado e de coeficientes de luz natural. Para o cálculo das componentes refletidas externa e interna. TropiLux (Figura 17) utiliza a subdivisão de céu proposta pela CIE (*Commission Internationale de L'Eclairage*), que o divide em 145 partes, e utiliza uma subdivisão mais refinada com 5221 partes, para melhorar a precisão dos resultados em função do tamanho angular do sol, para o cálculo da componente direta (CABÚS, 2005).

Para comprovar a similitude das medições reais da iluminação natural com os valores simulados no programa TropiLux, foram realizadas medições no quarto eleito, foram tomados 20 pontos e comprovou-se que os resultados são similares em ambos os casos. Os resultados e dados da comparações estão no Apêndice 1.

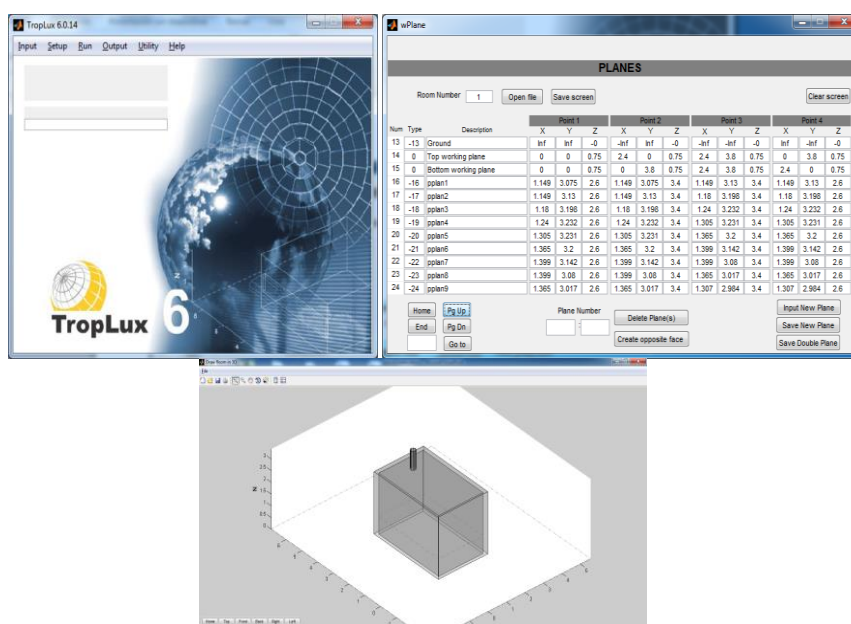


Figura 17. Tela do trabalho do TropiLux 6
Fonte: TropiLux (2012)

3.3.1.2 Critérios de Comparação do Desempenho dos Dutos de Luz Solar

O objetivo desta etapa é fazer a eleição do tubo de luz com melhor desempenho para simular este tubo em ambiente real de uso na seguinte etapa. Os principais parâmetros a serem considerados nas simulações estão resumidos na tabela 9, esta tabela mostra quais são os parâmetros ambientais e geométricos que influenciam para os resultados de avaliação do desempenho de dutos solares.

Tabela 9. Parâmetros para a definição do desempenho dos dutos solares nas simulações

Parâmetros Geométricos			Parâmetros ambientais
Parâmetros Geométricos do duto	Parâmetros Geométricos da Sala	Componentes Ópticos	
Forma do duto	Sistemas de Iluminação existentes na sala	Refletâncias e transmitâncias dos materiais dos tubos	Coordenadas Geográficas
Uso de Cotovelos	Geometria da sala	Refletâncias e transmitâncias da sala	Azimuth
Diâmetro do Tubo	Plano de trabalho	Uso de elementos ópticos adicionais no coletor	Datas e horas simuladas
Forma do Difusor	Fontes obstrutoras internas de luz	Uso de elementos ópticos adicionais no difusor	Tipos de Céu
Forma do Coletor	Fontes obstrutoras externas de luz	Uso de elementos de redirecionamento de luz	Irradiação Solar e Componente Solar

Fonte: Adaptado de Soto (2010); Kocijaf et al (2012)

Nesta etapa foram consideradas os parâmetros ambientais e geométricos das simulações, que estão apresentados na Figura 18. Todos os dados de entrada e de saída usados na simulação estão mostrados nesta figura, para poder obter os resultados mais exatos na comparação do desempenho dos dutos de luz solar propostos.

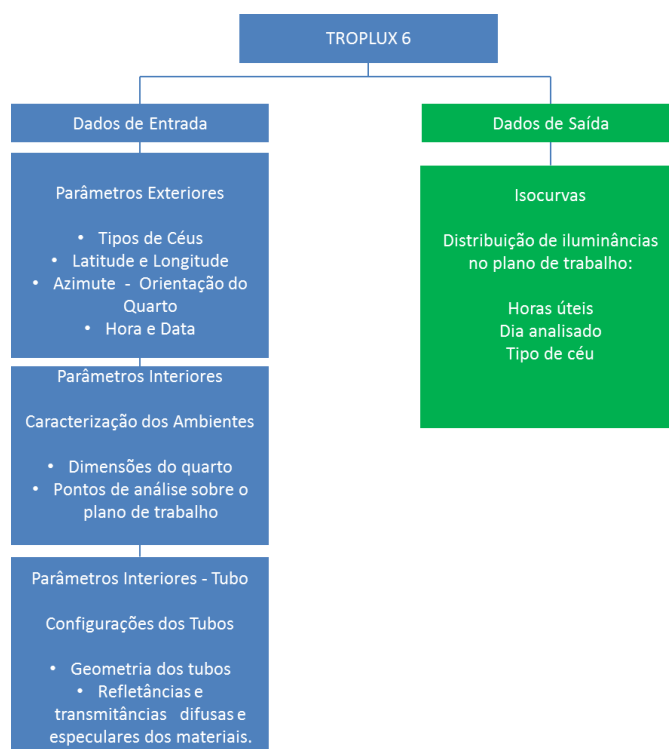


Figura 18. Dados de Entrada e de Saída utilizados para a simulação no Software Troplux, para a comparação de modelos

Fonte: A autora (2012)

3.3.1.3 Previsão do desempenho do duto solar em ambiente real de uso.

De acordo com a etapa anteriormente explicada, se faz a seleção do duto de luz mais eficiente, para prosseguir com a simulação no ambiente real de uso, isto é, o duto de luz eleito com o parâmetro da janela existente na sala simulada e onde posteriormente foi instalado o tubo. Do mesmo jeito é feita a simulação do desempenho lumínico da sala sem o tubo, estes resultados serão posteriormente usados nas seguintes etapas.

Os parâmetros ambientais e geométricos usados nesta etapa da simulação estão resumidos na figura 19, para este caso teve-se em consideração como parâmetro geométrico da sala, a influência de um sistema simples de iluminação: a janela.

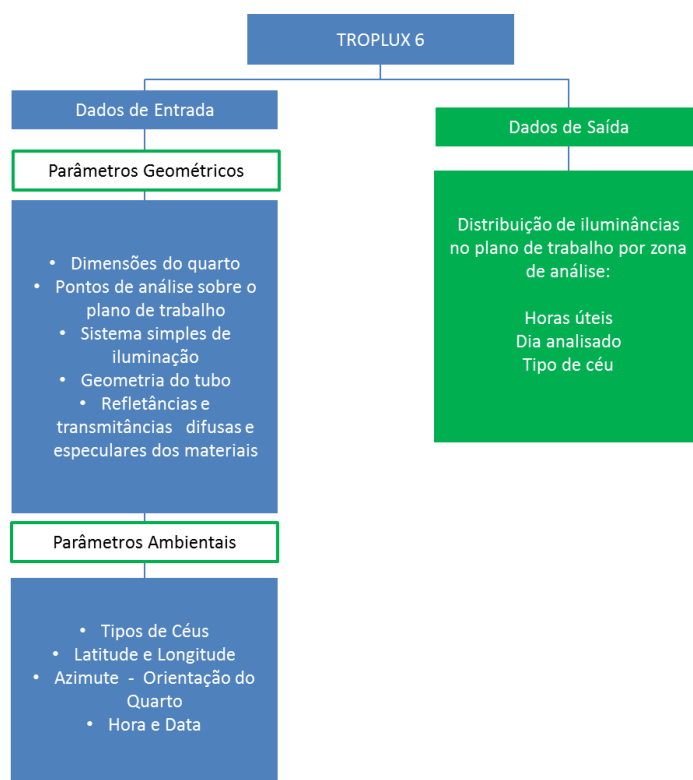


Figura 19. Dados de Entrada e de Saída utilizados para a simulação no Software Troplux, em ambiente real de uso.

Fonte: A autora (2012)

3.3.1.4 Estratégia de Análise

A partir da simulação de todas estas variáveis nos parâmetros, será possível determinar os parâmetros de design para a configuração do produto, neste caso será proposto o design final de cada uma das peças que compõem o tubo de luz solar.

Estes dados obtidos a partir do desempenho do duto de luz solar, serão analisados também, de acordo com o cumprimento da norma NBR 8995 (ABNT, 2013), para saber em que horas determinadas é possível atingir o mínimo nível de iluminação exigido pela norma.

3.3.2 Configuração do Tubo de luz Solar

A etapa de configuração do tubo solar tem como objetivo realizar a confecção e instalação do protótipo, e analisar uma estimativa de economia de energia e payback do sistema considerando os parâmetros estabelecidos na primeira fase, de simulação. A Figura 20 mostra as etapas envolvidas nesta fase.

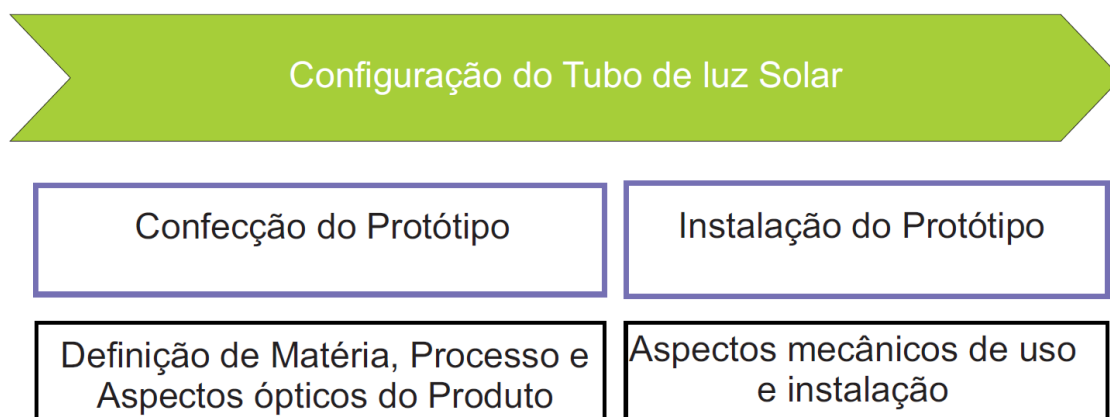


Figura 20. Etapas e coleta de dados envolvidos na configuração do produto

3.3.2.1 Confecção do Protótipo

Definição de Matéria, Processo e Aspectos ópticos do Produto

Os materiais, devido a suas propriedades ópticas, influenciam no desempenho dos dutos solares (KIM e KIM, 2010b). O quadro 6 mostra as principais considerações ao momento de fazer a seleção dos materiais para as tecnologias dos dutos de luz solar.

Características	Recomendações	Referências	
Coletor: Fácil manutenção Proteção UV Elementos redirecionamento de luz Alta transmitância	Tecnologia Rybender Metacrílico	Comercial Solatube Chatron Espacio Solar	Literatura Baroncini et al (2010) Mohelnikova (2009) Kim e Kim (2010b) Paroncini; Calcagni; Corvaro (2007)
Tubo: Exterior: Material Resistente, Baixo Peso	Alumínio		
Revestimento Interior: Deve ser altamente Reflexivo	Alumínio 99 % refletividade Alumínio TS-V98100. Spectralight Mylar®		
Difusor: Bloqueio de raios UV e infravermelhos. Elementos óticos para melhorar e eficiência de difusão de luz	Lente Fresnel Lente Prismática		

Quadro 6. Principais considerações para a seleção dos materiais para os tubos de luz solar
Fonte: Adaptado de Toledo, Busch e Pelegriani (2012).

Para o processo de manufatura dos dutos de luz solar serão considerados processos manuais integrados com a manufatura em máquinas CNC, dependendo esta etapa da seleção dos materiais como da determinação de todas as partes componentes do sistema.

3.3.2.2 Instalação do Protótipo

Aspectos mecânicos de uso e instalação

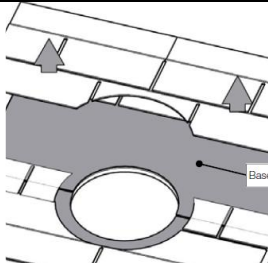
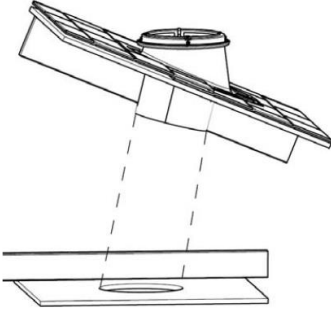
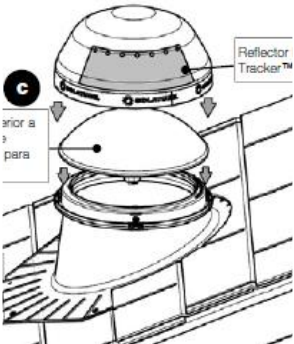
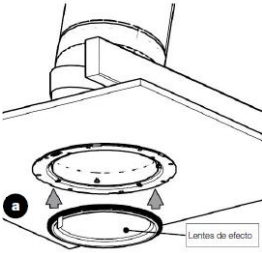
O quadro 7 resume os principais parâmetros a serem considerados ao momento de fazer a instalação dos tubos de luz, estes parâmetros foram achados na literatura como também nos manuais de instalação das empresas que comercializam estes produtos.

Características	Recomendações	Referências	
Infiltrações por chuvas	Uso de materiais de vedação.	Comercial Solatube Chatron Espacio Solar	Literatura Souza (2005) Paroncini; Calcagni e Corvaro (2007) Kim e Kim (2010b) Ibarra (2010) Kocifaj et al (2012)
Posicionamento do coletor	Posicionar o coletor para a linha do Equador.		
Melhorar eficiência quando não recebe irradiação solar direta.	Uso de elementos direcionadores de luz no coletor.		
Base para o telhado	Elemento resistente as condições de interpérie do local a ser instalado.		

Quadro 7. Principais considerações para fazer a eleição dos materiais para os tubos de luz solar

Fonte: Adaptado de Toledo, Busch e Pelegriani (2012).

Será considerado como modelo referencial, as instruções de instalação da empresa Solatube, tomou-se como referência o modelo mais típico desta empresa (Quadro 8). No capítulo 5 será desenvolvido um manual de instalação do protótipo a ser configurado, este manual corresponde às características da casa de teste onde foi instalado o duto de luz solar.

Exemplo de Passo-Passo para Instalação do duto solar	
Localizar o lugar de Instalação no teto	
Fazer o buraco no teto e forro	
Retirar as telhas	
Colocar base do sistema	
Parafusar e fixar a base ao teto	
Colocar o tubo	
Fixar o tubo à base	
Fixar elemento para redirecionar a luz ao domo	
Colocar e fixar o domo	
Colocar o anel de teto para difusor	
Colocar o difusor	

Quadro 8. Passo a Passo da instalação de um tubo solar.
Fonte: Adaptado de Solatube(2012)

Orçamento para a configuração do tubo

O orçamento de todos os materiais utilizados para fazer a configuração final do duto solar, será considerado nesta pesquisa. Dependendo esta fase da etapa da configuração do produto. Este dado será utilizado na etapa de análise da estimativa do payback.

3.3.3 Avaliação Pós-Instalação

Nesta etapa foram realizadas diferentes avaliações do desempenho do duto, de acordo com as variáveis de iluminação propostas nas etapas anteriores. Do mesmo jeito foi possível realizar uma estimativa de economia de energia e payback do sistema na fase pós-instalação. A Figura 21 mostra as etapas envolvidas nesta fase.

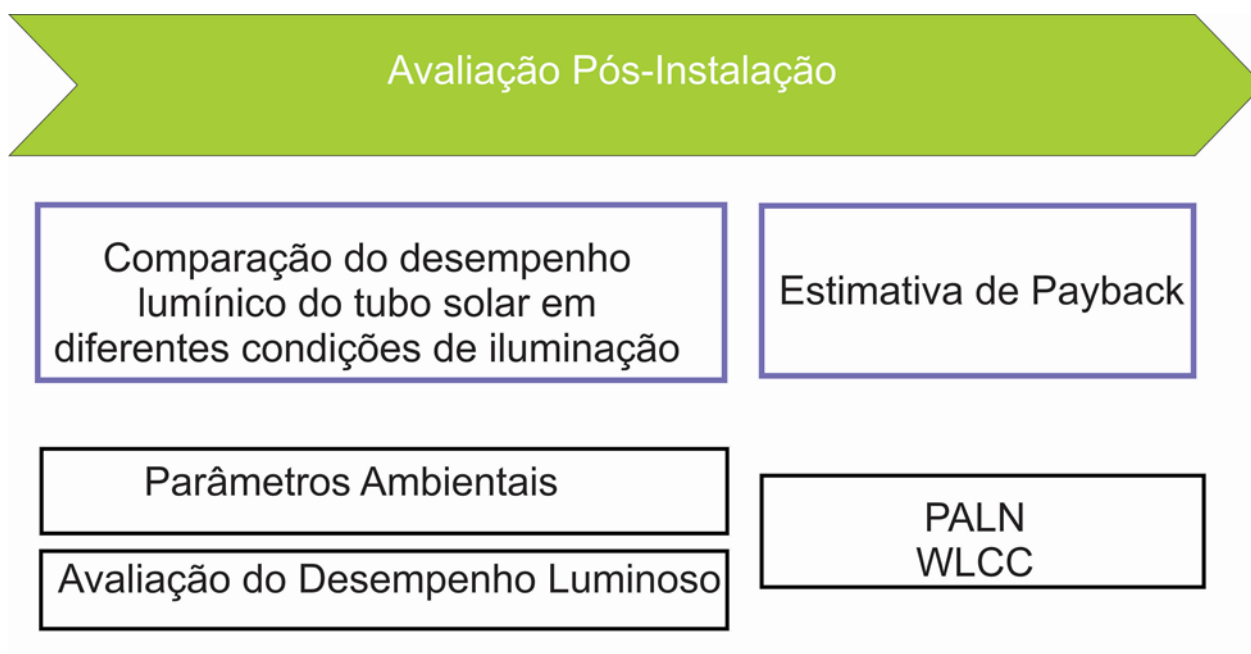


Figura 21. Etapas e coleta de dados envolvidos na avaliação Pós-Instalação

3.3.3.1 Instrumentação

Para a condução da presente pesquisa foram utilizados os fotômetros calibrados em lux, denominados luxímetros, com sensores incorporados que registraram as medições ambiente eleito. O modelo do luxímetros (tipo de luxímetro portátil) é o LX1330B (Figura 22). As características principais deste luxímetro com sensor incorporado são:

- Luxímetro Medidor de luz : 0.1 a 200000 Lux (Smart Sensor) .
- Precisão: +/- (3% rdg+10dgt) ou +/- (5% rdg+10dgt) como > 20,000lux/2,000fc
- Repetibilidade: +/- 2 %
- Tempo de amostragem: Aprox. 2 vezes por segundo
- Característica de temperatura: $\pm 0,1\%$ / C^0
- Equipamento Calibrado de Fábrica

Nesta pesquisa foram utilizados quatro luxímetros do modelo anteriormente descrito com sensores e sem memória.



Figura22. Luxímetro LX1330B com smart sensor
Fonte: HISTEST, 2012

3.3.3.2 Comparação da Iluminação do Tubo de luz em condições diferentes de iluminação

O desempenho do protótipo, de acordo com o resultados das etapas anteriores, será avaliado, com as variáveis de iluminação a ser propostas, no ambiente real de uso, para isto serão feitas medições com os luxímetros para conhecer a influência destas variáveis de iluminação sob o desempenho do duto de luz solar.

Condições Ambientais

O melhor desempenho dos dutos solares, nos diferentes estudos desenvolvidos é em condições de céu claro e parcialmente nublado, em altitudes solares de solstício de verão e equinócio de primavera, nos horários diurnos, especialmente perto do meio dia (KIM e KIM, 2010; LI et al, 2010; VERSO; PELLEGRINO e SERRA, 2011).

Nesta pesquisa devido às limitações de tempo, o tubo será analisado nos meses de Junho, Julho e Agosto de 2013, na estação de inverno, assim, as condições solares e de céu nestes meses, na cidade de Curitiba são de céu coberto e parcialmente coberto.

Pontos de Análise

Um próprio esquema foi realizado para estas medições, baseado nos métodos desenvolvidos por Paroncini; Calcagni e Corvaro (2007), Mohelnikova (2009) e Li et al (2010). Também foi registrada a iluminância global nos dias que foram efetuadas as medições, para determinar o nível de iluminação que entra ao tubo. Este dado é importante ao momento de calcular a quantidade de luz a ser transmitida através do duto de luz solar, para poder calcular a eficiência do sistema de luz.

Avaliação do Desempenho Luminoso

a avaliação foram utilizadas diversas fórmulas para determinar a eficácia do sistema proposto nos diferentes tipos de céu e variáveis de iluminação. Para determinar a performance dos dutos solares é importante calcular a quantidade de luz de dia transmitido a través do tubo (Li et al, 2010), para isto será usada a seguinte fórmula:

$$t = \frac{F_{out}}{F_{in}} \quad 8$$

Onde F_{in} é o fluxo luminoso chegando ao tubo de luz e F_{out} é o fluxo luminoso que passa pelo tubo de luz. O valor t varia periodicamente, a maior valor de t , maior luz de dia transmitida através do tubo (LI et al, 2010). Com base neste princípio o fluxo luminoso (lumem) é produto da iluminância e área da superfície. Neste caso o F_{in} pode ser expressado da seguinte forma:

$$F_{in} = \pi r^2 \times E_{ex} \quad 9$$

Onde E_{ex} é a iluminância que entra no tubo de luz (lx) e r é o rádio do coletor do tubo de luz (m). (LI et al, 2010).

3.3.3.3 Estimativa de Economia de Energia e Payback do sistema

Para o cálculo da economia de energia e do payback, será utilizado o método do PALN. O método PALN (Percentual de Aproveitamento da Luz Natural), desenvolvido por Souza (2003), serve para estimar a quantidade de energia economizada com a utilização da luz natural.

O PALN indica qual é a quantidade de energia que pode ser economizada mediante o aproveitamento da luz natural e permite a comparação entre diversas estratégias de controle da iluminação artificial (DINONÉ e PEREIRA, 2010). O PALN estabelece o período no qual a luz natural poderá substituir ou complementar a luz artificial (equação 4).

$$PALN = PALN_s + PALN_c \quad 10$$

Onde:

$PALN$ é o percentual de aproveitamento da luz natural [%];

$PALN_s$ é o percentual de aproveitamento da luz natural por substituição da iluminação artificial [%];

$PALN_c$ é o percentual de aproveitamento da luz natural por complementação da iluminação artificial [%].

O fator de economia dependerá da relação que existe entre o número de horas em que a iluminância da luz natural é maior que a iluminância de projeto pelo número total de horas (n) de utilização de luz natural no ambiente. Estes parâmetros estão na equação 5.

$$PALN_s = \frac{\sum_0^n E_{ln} \geq E_p}{n} \quad 11$$

Onde, E_{ln} é a iluminância média proporcionada pela luz natural; E_p é a iluminância do projeto e n é o número de horas analisadas. Para calcular o percentual de aproveitamento da luz é feita a ponderação de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada tipo de céu para os meses analisados, de acordo com a equação 6:

$$PALN_P = (PALN_{CC} \cdot \rho_{CC}) + (PALN_{CP} \cdot \rho_{CP}) + (PALN_{CE} \cdot \rho_{CE}) \quad 12$$

Onde:

$PALN_P$ é o percentual de aproveitamento da luz natural ponderado [%];

$PALN_{CC}$ é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu claro [%];

$PALN_{CP}$ é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu parcialmente encoberto [%];

$PALN_{CE}$ é o percentual de aproveitamento da luz natural com céu encoberto [%];

ρ_{CC} é a probabilidade de ocorrência de céu claro [adimensional];

ρ_{CP} é a probabilidade de ocorrência de céu parcialmente encoberto [adimensional];

ρ_{CE} é a probabilidade de ocorrência de céu encoberto [adimensional].

Esta economia será calculada de acordo a uma estimativa em base aos resultados das medições em ambiente real de uso. Para isto será usados os valores médios dos dias onde foram registradas as medições.

Para calcular o payback, será utilizada a fórmula do método WLCC (*Whole life cycle costing*), que, permite avaliar os custos e benefícios de um determinado sistema, considerando diversos fatores que influenciam o esquema de iluminação (BOUSSABAIN e KIRKHAM, 2004). Esta fórmula já foi usada para calcular o payback do sistema de tubos solares por Mayhoub e Carter (2011). O NPV (Valor líquido presente) serve para medir o valor líquido de um investimento e é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$NPV = \sum \Delta PV_S + R_0 - [I_{0-DL} + \sum PV_{M-DL} + \sum PV_J] \quad 13$$

Onde o I_{0-DL} é o investimento inicial do sistema de iluminação (R \$), ΔPV_S é o custo total anual de economia sobre o uso de somente o sistema de iluminação elétrico convencional (R \$), o R_0 é o valor residual do sistema de iluminação (R \$), o PV_{M-DL} é o custo anual de manutenção do sistema de iluminação natural (R \$) e o PV_J é o investimento futuro para substituição do sistema (MAYHOUB e CARTER, 2011).

Para o caso desta pesquisa, o resultado obtido com o PALN, será utilizado para calcular o ΔPV_S (custo anual de economia de energia) e o orçamento final para configurar o duto será considerado no I_{0-DL} , que seria o custo para o investimento inicial para a configuração do tubo de luz solar.

Neste caso os custos totais do duto de luz solar estão compostos pelo preço inicial do sistema, os custos de substituição do sistema e o custo anual de manutenção (MAYHOUB e CARTER, 2011). Um NPV com valor zero indica que a soma da poupança de energia e o valor residual do sistema é igual a soma dos seguintes valores: o preço do tubo, a substituição do sistema e o custo de manutenção anual do sistema.

3.3.3.4 Estratégia de Análise

De acordo com os resultados obtidos nas medições, com as diferentes variáveis de iluminação propostas, será realizada a comparação do desempenho destas variáveis, deste modo se poderá determinar mais parâmetros para o desenvolvimento de dutos solares.

Com base no resultado das medições é possível, calcular a economia de energia, e usando dados da fase de configuração do produto, fazer uma estimativa do payback do sistema proposto.

3.3.4 Análise dos Resultados - Definição de Parâmetros de Design para o desenvolvimento de dutos de luz solar

De acordo com os resultados de todas as etapas anteriormente explicadas, será realizada uma análise e discussão dos resultados, para finalmente definir os parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar, no contexto do setor residencial.

Para isto serão considerados os parâmetros achados na simulação do desempenho dos dutos de luz solar, a etapa de configuração e instalação do protótipo e análise pós-instalação do duto de luz solar proposto nesta pesquisa (Figura 23).

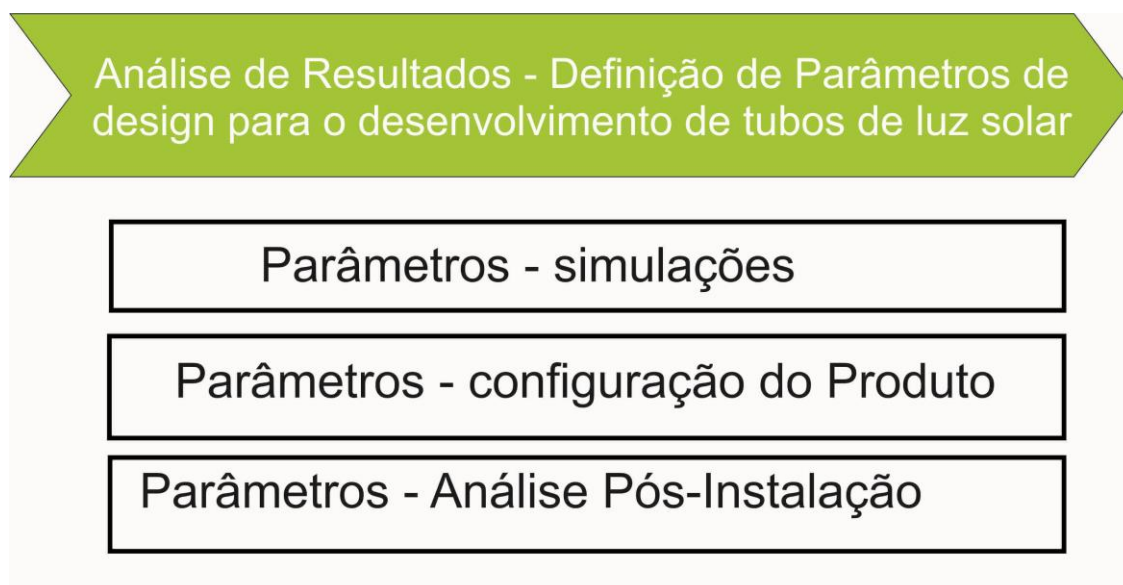


Figura 23. Coleta de dados envolvidos para a definição de parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram definidos e caracterizados cada uma das fases para a condução da presente pesquisa, como os métodos efetuados para a coleta de dados em cada fase de estudo, foi explicada a estratégia de análise de resultados para cada uma das etapas.

Com base a fase de simulação pré-configuração do produto, será possível determinar os parâmetros de design para a confecção do protótipo. Observa-se que nesta etapa serão considerados as condições ambientais da cidade de Curitiba e do local de instalação real do duto de luz solar.

A partir dos resultados obtidos no capítulo de simulações será feito o prototipagem do produto. Este duto de luz solar será posteriormente analisado na fase pós-instalação. Nesta etapa serão avaliados os componentes dos dutos de luz solar sobre diferentes variáveis de iluminação. Estas variáveis serão definidas na etapa de configuração do produto. Uma limitação deve ser considerada na fase de avaliação do desempenho lumínico, o tempo no qual serão efetuados os registros das medições: meses que correspondem à estação de inverno.

Com os resultados da fase de configuração e análise pós-instalação pode ser estimada a economia de energia e payback do sistema proposto, considerando sempre o contexto atual da pesquisa. Observa-se que esta avaliação está também sobre as condições ambientais do local de instalação do protótipo.

Com base à análise dos resultados das 3 etapas anteriores: simulação pré-configuração, configuração e avaliação pós-instalação, será possível determinar os parâmetros de design e configuração dos dutos de luz solar, e assim, atingir o objetivo desta pesquisa.

CAPITULO 4 – SIMULAÇÕES PRÉ-CONFIGURAÇÃO DO DUTO DE LUZ SOLAR

Nesta seção são descritas as principais informações que sintetizam os resultados das duas fases de coleta de dados seguindo o método descrito no capítulo 3. Como resultados, da primeira etapa, são apresentadas as simulações do desempenho dos três tubos solares e estes resultados são comparados para determinar qual é o duto solar mais eficiente para ser configurado na realidade. Como resultados da segunda etapa é apresentado o resultado da simulação do desempenho do duto de luz solar selecionado em ambiente real de uso.

4.1 Parâmetros de Simulação

4.1.1 Parâmetros Ambientais de Simulação

A figura 24 mostra a tela de trabalho do TropiLux, com as ferramentas para inserir dados de parâmetros ambientais nas simulações, entre esses dados estão os: tipos de céu, azimute, cidade, data e hora.

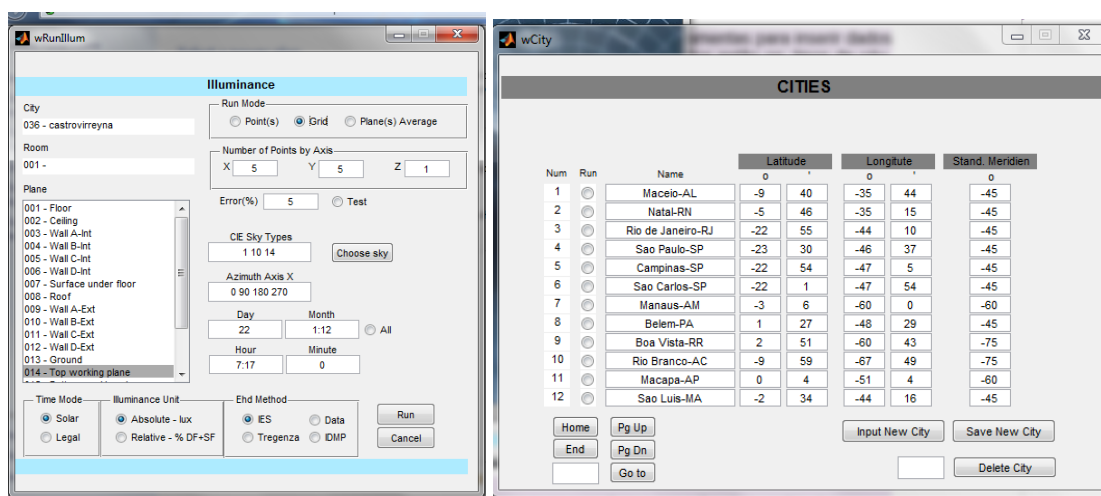


Figura 24. Dados de entrada que correspondem aos parâmetros ambientais

Fonte: TropiLux (2012)

Tipo de Céu

Para a simulação, foram eleitos três tipos de céu padronizados pela CIE (2003) e que estão disponibilizados no software TropiLux. Foram selecionados os seguintes tipos de céus: 5, 10 e 15; sendo que o céu tipo 5 corresponde ao céu encoberto, o céu tipo 10 corresponde ao céu parcialmente nublado e o céu 15 ao céu claro. Estes três tipos de céus são suficientes para definir as condições de luz natural num clima (SOTO, 2010).

Latitude e Longitude

Os modelos a serem simulados consideram a latitude e Longitude da cidade de Curitiba, para este caso a latitude é de -25.51° e a longitude é de -49.27° , a programação de diversas cidades do Brasil é uma ferramenta do software.

Hora e Data

Foram realizadas as simulações no período entre 07h e 17h, hora solar, nos solstícios de inverno e verão (22/06, 22/12), além do equinócio de outono e primavera (22/03, 22/9), datas correspondentes ao hemisfério Sul, com a finalidade de determinar a eficácia do sistema ao longo do ano.

Azimute

Como azimute com respeito ao eixo x, foi tomado 21° , por ser este a orientação da casa de teste com relação ao norte.

4.1.2 Parâmetros Geométricos de Simulação

A Figura 25 mostra a tela de trabalho do Troplux, com as ferramentas para inserir dados de entrada de parâmetros geométricos nas simulações, esses dados são principalmente as características dos materiais de cada um dos componentes da sala.

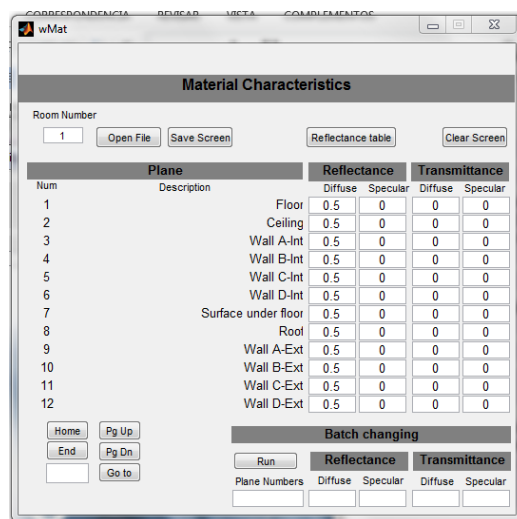


Figura 25. Dados de entrada que correspondem aos parâmetros geométricos
Fonte: Troplux (2012)

4.1.2.1 Caracterização do ambiente de teste

O duto de luz solar foi instalado na casa 1.0, da Universidade Federal do Paraná, localizada no campus Politécnico da Universidade na região sudeste da cidade de Curitiba. Esta casa está disponibilizada aos estudantes da UFPR para a realização de testes de produtos voltados à sustentabilidade, os ambientes da casa são similares aos ambientes de uma

residência típica, como dado para as simulações, se utilizarão os materiais mais parecidos aos desta casa.

O ambiente de teste corresponde à sala de jantar e sala de estar da casa protótipo (variando o uso final deste ambiente de acordo as necessidades diretas do usuário), esta seleção está baseada nas medições preliminares realizadas com o luxímetro em cada um dos ambientes de casa, seguindo a norma NBR 15215 (ABNT, 2005).

Para realizar as medições, foi identificado o ambiente que mais luz precisaria, também foi identificado o ambiente, de acordo com a estrutura do teto e aos experimentos existentes na casa 1.0, qual seria a melhor ubiquação do tubo, para evitar possíveis interferências com os experimentos já existentes.

Este ambiente tem como dimensões 2,40 m x 3,80 m (Figura 26). Para estas simulações foi efetuado, no programa, a construção deste quarto sem a janela, porque o objetivo das simulações não é comparar a eficiência dos dutos com o sem janelas, mas sim comparar a eficiência entre tubos com três diferentes geometrias, para fazer a seleção do tubo mais eficiente.

A tabela 10 mostra as características dos materiais da sala, com suas respectivas refletâncias e transmitâncias, as características dos materiais usados nas simulações são os mais similares dos materiais usados na casa 1.0.

Tabela 10.Características dos materiais da sala.

Superfícies	Materiais	Refletâncias/Difusa	Transmitâncias / Especular
Piso	Cerâmica	0.45	-----
Paredes	Pintura branca sobre tijolo	0.70	-----
Teto/Forro	Madeira Escura	0.25	-----

Fonte: Adaptado de Troplux (2012)

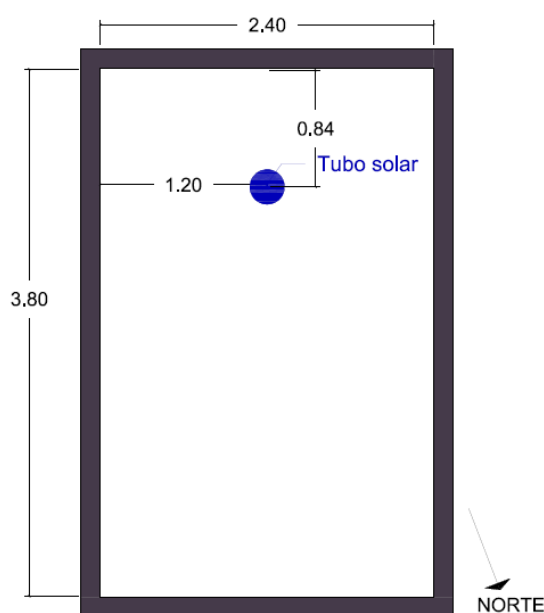


Figura 26. Dimensões do ambiente utilizado nas simulações e ubiquação do tubo.

Fonte: A autora

4.1.2.2 Refletâncias e Transmitâncias dos materiais adotados nas simulações

A eficácia dos tubos depende em grande medida da porcentagem de refletância interior do tubo (MOHELNIKOVA, 2009; KOMAR e DARULA, 2012), por esta razão é um fator importante a ser considerado nas simulações (SOTO, 2010).

Os materiais utilizados na modelação do canal do duto e sua respectiva refletância especular foram definidas (Tabela 11). Também foram definidas as refletâncias e transmitâncias dos coletores e difusores, todos estes fatores importantes ao momento de determinar o desempenho do tubo. Os três tubos simulados possuem as mesmas características ópticas dos materiais.

Tabela 11. Refletâncias e Transmitâncias dos materiais adotados nas simulações.

Material	Transmitância Especular	Refletância Especular
Lâmina mylar® (interior do duto solar)	----	0.90
Coletor policarbonato	0.98	0.08
Difusor Policarbonato	0.98	0.08

Fonte: INDAC (2012); Professional Plastics (2012).

4.1.2.3 Pontos de Análise

Para a análise do desempenho dos sistemas, foi definida uma malha de 20 pontos localizados à altura do plano de trabalho de 0,75m, como está indicado na Figura 27, estes 20 pontos foram definidos para o cálculo usando a norma técnica brasileira NBR 15215-3 (ABNT, 2005).

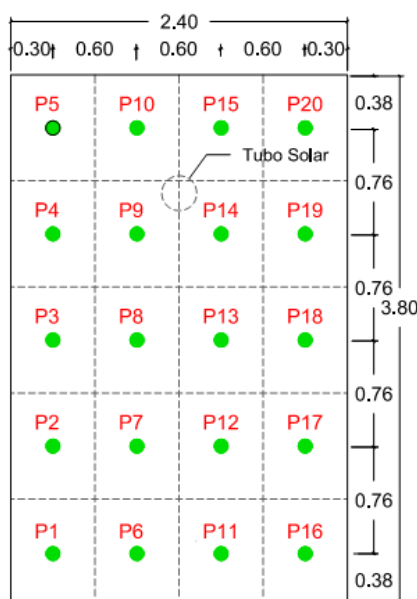


Figura 27. Esquema do ambiente e pontos de análise para a simulação

Fonte: A autora

4.1.2.4 Geometria do duto

De acordo com Kocijaf et al (2012) a eficiência de transmissão de luz é mais elevada, se o limite superior do tubo é desviado com direção ao sol. Serão considerados, três ângulos de orientação, o primeiro tubo será reto, isto é, sem nenhum ângulo de orientação, mas com o coletor orientado para a linha do Equador, o segundo estará orientado a 30° , com respeito ao eixo y e a melhor inclinação, de acordo com a carta solar de Curitiba, por não receber irradiação solar direta no solstício de verão, no horário do meio dia, onde a altitude solar é de 85° , sendo 30° a melhor orientação para evitar esta altitude nesta data e hora.

O terceiro estará orientado a partir da metade do tubo com um cotovelo de 30° com respeito ao eixo y. A partir do análise da carta solar de Curitiba (Figura 28), foram consideradas estas três configurações dos tubos solares.

Os captadores de luz solar serão orientados ao norte nos três modelos de simulação, com direção à linha do Equador para aproveitar a máxima irradiação solar (SOUZA, 2005). Neste caso, os três modelos de tubos possuem o mesmo tipo de difusor e captador. O tubo é mais eficiente quando tem menor comprimento, dependendo isto também da ubiquação onde será instalado o tubo, se a localidade está ou não distante da linha do Equador (KOCIJAF et al, 2012, LI et al, 2010).

Para a configuração virtual dos tubos foi considerado o seguinte: A relação diâmetro/comprimento do tubo é de 1/3. O comprimento dos tubos é de 75 cm de altura, variando esta medida para o tubo 2 e 3 de acordo com a inclinação e a angulação de 30° . Os coletores e difusores dos três dutos simulados têm as mesmas características geométricas de 25 cm de diâmetro e apresentam forma plana.

As duas inclinações do segundo e terceiro tubo são feitas para comprovar se através destas inclinações pode-se evitar a irradiação solar direta ao medir o desempenho dos tubos. A geometria e medidas dos três tubos estão mostrados na Figura 28.

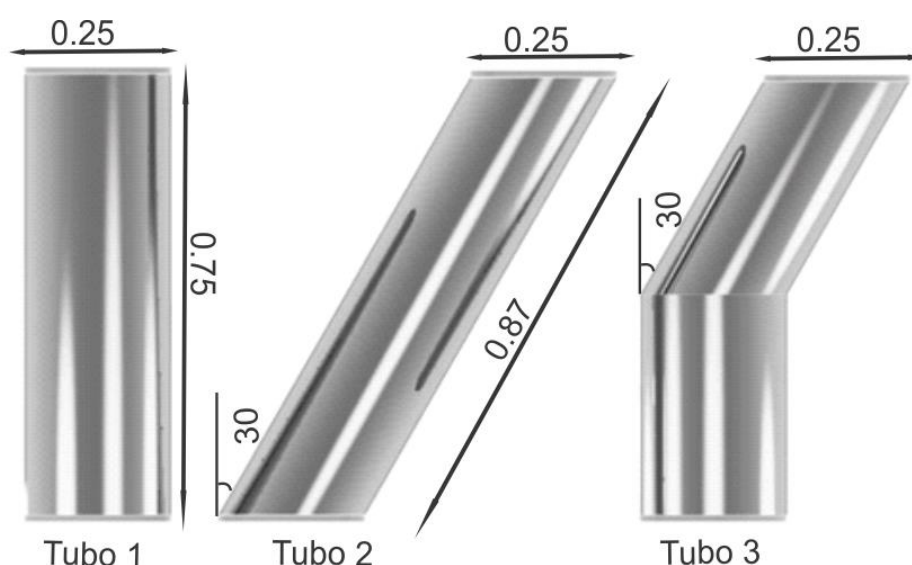


Figura 28.Três modelos simulados no TROPLUX

Fonte: A autora

As 720 tabelas geradas estão resumidas em três tabelas organizadas pelos três tipos de céu tomados de acordo com a classificação da CIE (2003), cada tabela apresenta os valores das iluminâncias nos três tubos. Estas tabelas estão no apêndice 2 desta dissertação. Em seguida serão apresentados os resultados comparativos dos três tubos simulados.

4.2 Comparação do desempenho lumínico dos dutos de luz no software Troplux

4.2.1 Comparação dos três tubos para céu tipo 5 – Céu Coberto

A figura 29 apresenta a distribuição da luz para o céu tipo 5 nos meses de março e setembro. Para o céu tipo 5, no dia 22 de março, os três tipos de tubos apresentam os valores das iluminâncias mais elevadas ao meio dia, com o tubo 1 proporcionando as maiores iluminâncias, seguido pelo tubo 3 e finalmente o tubo 2.

No céu tipo 5 o dia 22 de setembro, os três tipos de tubos apresentam também os valores das iluminâncias mais altas ao meio dia, da mesma forma o tubo 1 obtém os valores mais elevados, seguido pelo tubo 3 e o tubo 2.

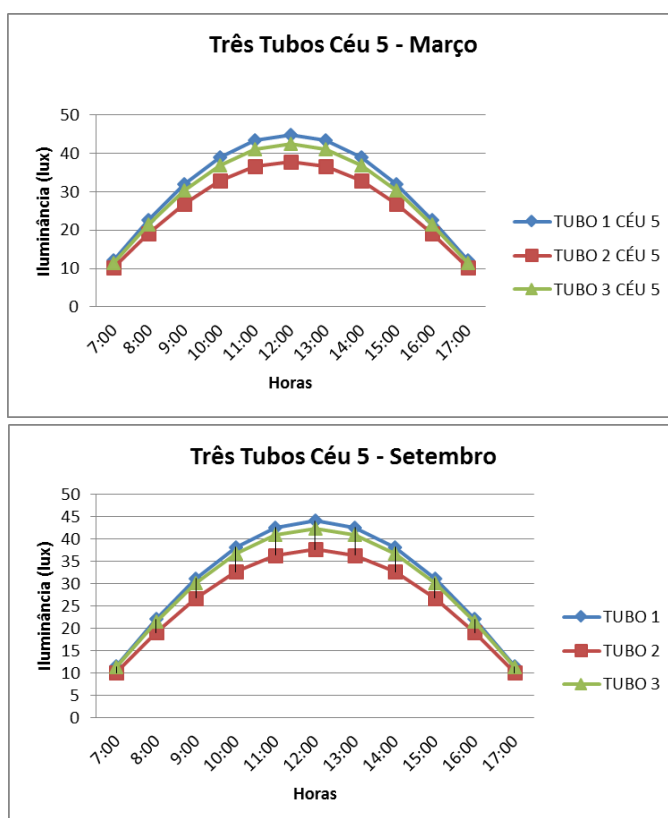


Figura 29. Distribuição da luz natural nos equinócios para os três tubos em céu tipo 5

Fonte: A autora

Como pode ser observado na Figura 29, o melhor desempenho luminoso para o céu 5 nos meses de março e setembro é apresentado no tubo 1, seguido do tubo 3 e finalmente o tubo 2, embora as diferenças dos valores entre o tubo 1 e 3 são mínimas.

A Figura 30 apresenta a distribuição da luz para o céu tipo 5 nos solstícios. Para o dia 22 de junho, os três tipos de tubos apresentam os valores das iluminâncias mais elevadas ao meio dia, sendo o tubo 1 o mais eficiente, seguido do tubo 3 e finalmente o tubo 2 é o menos eficiente. Nesta data, os valores são os mais baixos em comparação com outras datas, devido principalmente, a pertencer à estação do inverno.

No céu tipo 5, no solstício de verão, os três tipos de tubos apresentam também os valores das iluminâncias mais altas ao meio dia, neste caso também é observado que o tubo 1 tem os maiores níveis de iluminâncias seguido do tubo 3 e o tubo 2.

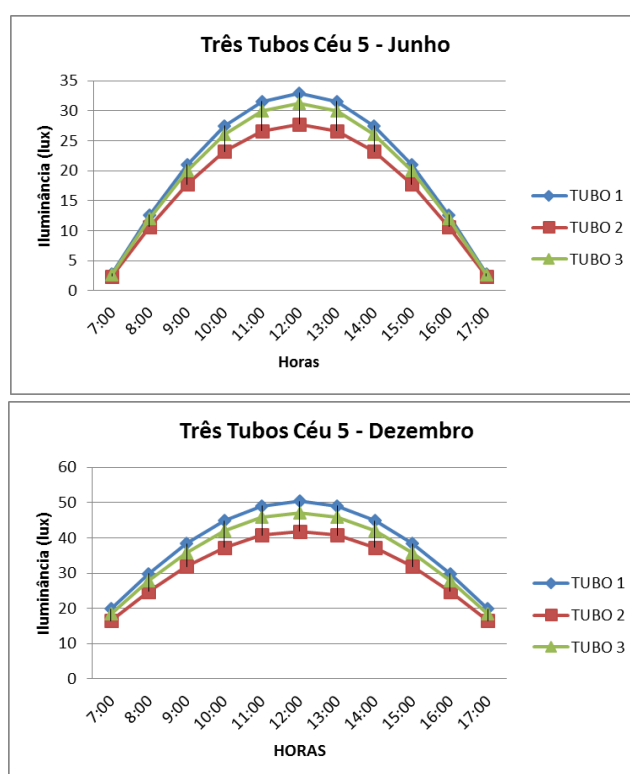


Figura 30. Distribuição da luz natural nos solstícios para os três tubos em céu tipo 5

Fonte: A autora

Na figura 30 observa-se que o melhor desempenho luminoso, no céu 5 nos meses de junho e dezembro é para o tubo 1, seguido do tubo 3 e finalmente o tubo 2 tem os menores valores de iluminâncias. Da mesma forma, para todos os casos e datas, neste tipo de céu coberto, as iluminâncias são relativamente baixas, mostrando-se, mínimas as diferenças entre os valores dos três dutos propostos.

Os valores baixos anteriormente mencionados são devido às características do tipo de céu analisado. A partir das simulações efetuadas para este tipo de céu, devido as diferenças mínimas de valores, não é ainda possível determinar o modelo mais eficiente.

4.2.2 Comparação dos três tubos para céu tipo 10 – Céu Semicoberto

A figura 31 apresenta a distribuição da luz para o céu tipo 10 – semicoberto, nos meses de março e setembro. Para o dia 22 de março, o tubo 1 tem o maior valor às 13 horas com, o tubo 2 tem o nível mais elevado às 11 horas e o tubo 3 tem o nível mais elevado às 11 horas. A figura 31 também mostra que para o dia 22 de setembro o tubo 1 tem o valor de iluminância mais elevado às 13 horas, o tubo 2 às 11 horas e o tubo 3 também às 11 horas.

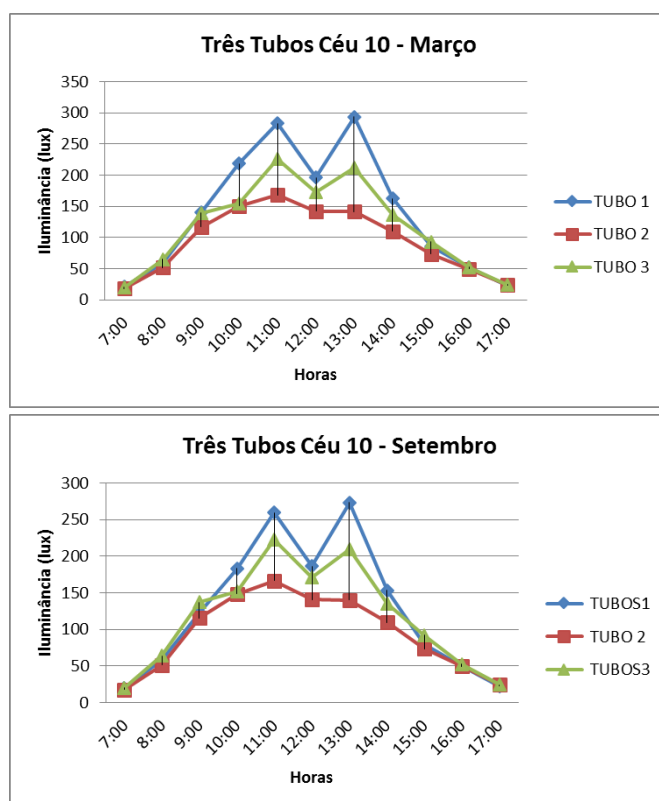


Figura 31. Distribuição da luz natural nos equinócios para os três tubos em céu tipo 10

Fonte: A autora

Observa-se que o melhor desempenho luminoso, no céu 10 - semicoberto, nos meses de março e setembro é para o tubo 1, seguido do tubo 3 e finalmente o de menor desempenho é o tubo 2, exibindo o tubo 3 melhor desempenho nos horários das 7 horas às 9 horas e das 15 horas às 17 horas, em setembro.

A Figura 30 exibe a distribuição da luz para o céu tipo 10 nos meses de junho e dezembro. O dia 22 de junho, o tubo 1 tem o maior valor às 12 horas, acontecendo o mesmo com o tubo 2 e 3. Para o dia 22 de dezembro o tubo 1 e 3 tem os valores de iluminâncias mais elevados às 11 horas, o tubo 2 às 13 horas.

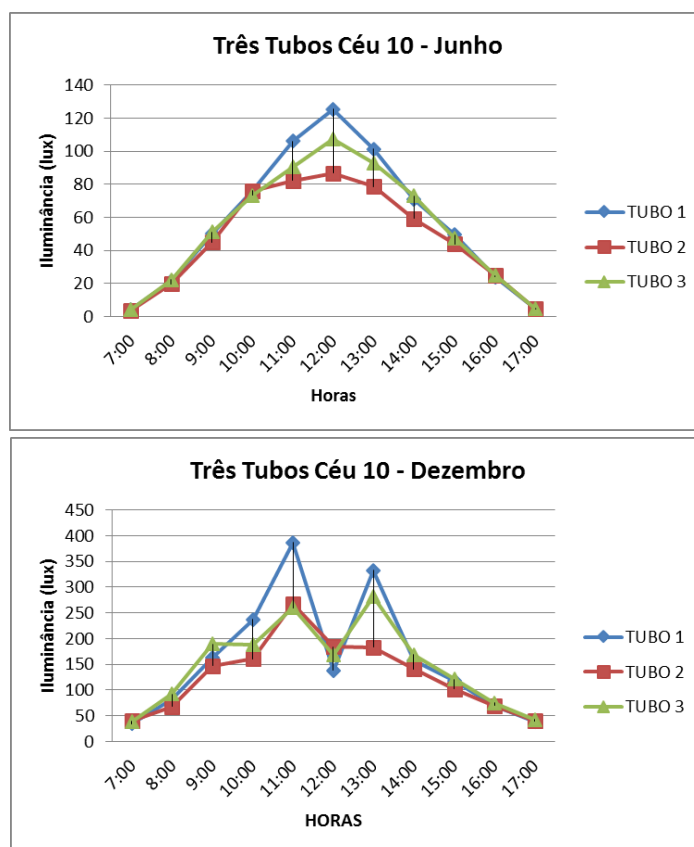


Figura 32. Distribuição da luz natural nos solstícios para os três tubos em céu tipo 10
Fonte: A autora

Neste caso o melhor desempenho luminoso, no céu 10 no mês de junho é para o tubo 1, seguido do tubo 3 e finalmente o de menor desempenho é o tubo 2; mas o tubo 3 tem melhor desempenho para o dia 22 de dezembro no decurso das horas, com exceção das 10, 11 e 13 horas, onde o tubo 1 tem maiores níveis de iluminâncias. A partir da análise deste tipo de céu pode-se observar a melhor performance do tubo 1 e 3, com diferenças nos valores das iluminâncias mais consideráveis.

4.2.3 Comparação dos três tubos para céu tipo 15 – Céu Claro

A Figura 33 mostra a distribuição da luz para o céu tipo 15 nos meses de março e setembro. Para o dia 22 de março, o tubo 1 tem o maior valor às 13 horas, o tubo 2 às 11 horas e o tubo 3 às 11 horas. Para o dia 22 de setembro o tubo 1 tem o valor de iluminância mais elevado às 13 horas, o tubo 2 às 10 horas e o tubo 3 às 11 horas.

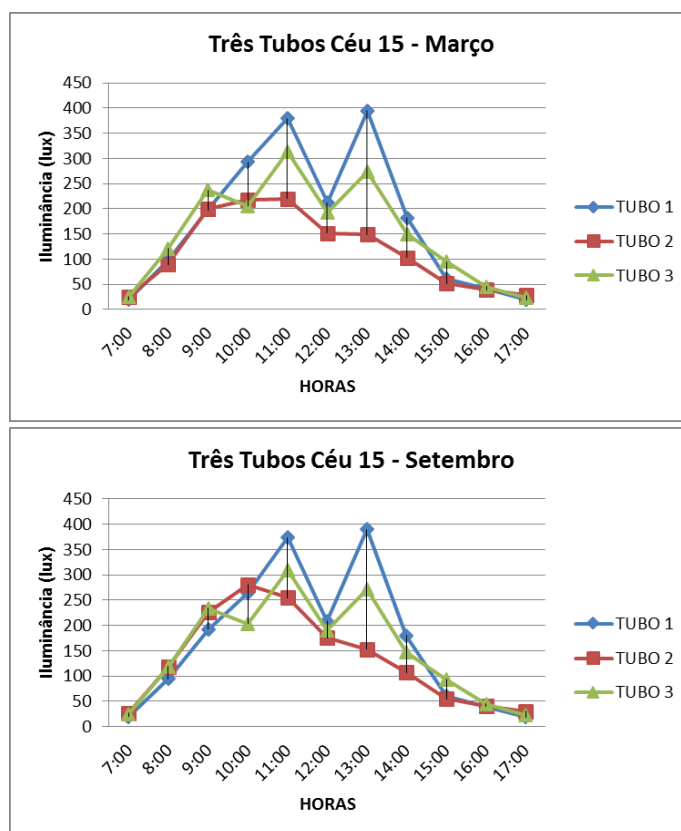


Figura 33. Distribuição da luz natural nos equinócios para os três tubos em céu tipo 15

Fonte: A autora

Na Figura 33 pode se observar que o melhor desempenho luminoso, no céu 15, no mês de março é para o tubo 1, seguido do tubo 3 e finalmente o de menor desempenho é o tubo 2, exibindo o tubo 3 maiores valores nos horários das 7 horas às 9 horas e das 15 horas às 17 horas. O dia 22 de setembro o tubo 1 apresenta maiores níveis de iluminâncias em comparação com os tubos 2 e 3 das 11 horas às 14 horas, o tubo 3 por outro lado apresenta maiores níveis de luz das 7 horas às 10 horas e das 15 às 17 horas em comparação com o tubo 1 e 2.

A Figura 34 apresenta a distribuição da luz para o céu tipo 15 nos meses de junho e dezembro. O dia 22 de junho, o tubo 1 tem o maior valor às 12 horas, acontecendo o mesmo com o tubo 3, no caso do tubo 2 o pico mais alto é às 10 horas. Para o dia 22 de dezembro o tubo 1 e 2 tem os valores de iluminâncias mais elevados às 11 horas, o tubo 3 às 13 horas.

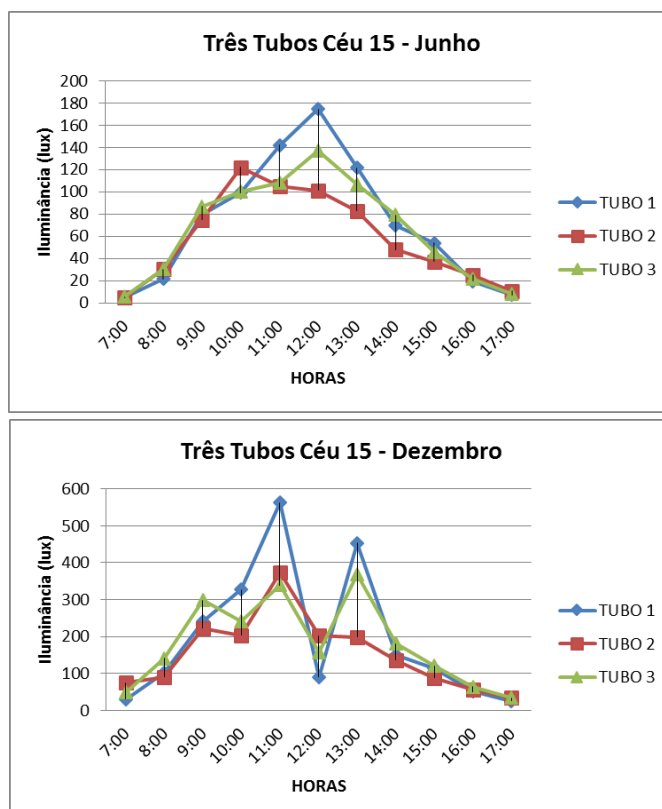


Figura 34. Distribuição da luz natural nos solstícios para os três tubos em céu tipo 15
Fonte: A autora

Neste caso, no céu 15 no mês de junho, o tubo 1 apresenta maiores iluminâncias nos horários das 11 às 13 horas e às 15 horas, para o caso do tubo 3 as maiores iluminâncias são apresentadas das 7 às 10 horas e às 14,16 e 17 horas.

Para o dia 22 de dezembro, o tubo 1 tem os maiores valores, com relação aos tubos 2 e 3, só às 10, 11 e 13 horas, o tubo 3 por outro lado tem maiores valores às 8 e 9 horas e das 14 às 17 horas. Para o caso do solstício de inverno, o tubo 1 de geometria reta é considerado o de melhor desempenho. No verão, o tubo 1 e 3 são os que apresentam o melhor desempenho, dependendo das horas analisadas.

4.3 Seleção do tubo com melhor desempenho.

Deve-se considerar que para o céu 5, que é o céu coberto, nas 4 datas simuladas; os três tubos simulados apresentam um desempenho baixo, acontecendo o contrário para os céus 10 – semicoberto (CIE, 2003) e 15 – Céu claro (CIE, 2003), que correspondem aos céus semicoberto e claro, onde este desempenho incrementa-se consideravelmente. Com base à análise anteriormente desenvolvida, o tubo eleito corresponde ao tubo, de geometria reta, o tubo simulado número 1.

De acordo com as simulações o tubo 1 apresenta melhor desempenho no céu tipo 5 para as 4 datas, tanto nos solstícios como os equinócios. O tubo 1, para o céu tipo 10- céu semicoberto, nos meses de março e setembro tem os níveis mais altos de iluminâncias, com

exceção das primeiras e últimas horas simuladas para o 22 de setembro, mas se observa que esta diferença é mínima.

Para o céu 10 no mês de junho, o tubo 1 apresenta o melhor desempenho, com exceção de algumas horas, mas esta diferença é mínima, por outro lado o tubo 3 tem melhor desempenho para o dia 22 de dezembro, com exceção de algumas horas, embora estas diferenças são também baixas. Deve-se considerar que além da iluminação distribuída pelo tubo, haverá no ambiente a iluminação da janela, que complementar os valores mais baixos de iluminâncias.

No céu 15 no mês de março, o tubo 1, pode ser considerado mais eficiente, embora nas primeiras e últimas horas o tubo 3 tem valores de iluminâncias maiores, mas estes valores não são muito diferentes comparados com o tubo 1. O mesmo fenômeno acontece no dia 22 de setembro com o tubo 1 e 3.

O tubo 1, para o mês de junho apresenta só maiores iluminâncias nos horários perto do meio dia, mas considerando que é o mês com menores valores de iluminâncias, estes picos altos são importantes nestas horas para a iluminação no ambiente. O tubo 3, para o dia 22 de dezembro, é apresentado como o mais eficiente, porque atinge em mais horários níveis mais altos, mas estas diferenças são mínimas em comparação com o tubo 1, é de importância considerar que é o dia com maior iluminação e que receberá também iluminação da janela.

Pelas razões anteriormente expostas, o tubo, de geometria totalmente reta, que corresponde ao número 1, será configurado na seguinte etapa para ser instalado na casa 1.0. As isocurvas calculadas para este tubo estão apresentadas no apêndice 3.

4.4 Simulação do desempenho lumínico do tubo de luz solar em ambiente real de uso

Como resultados da segunda etapa, são apresentadas as simulações comparativas do desempenho do duto de luz, eleito na etapa anterior, integrado no ambiente com a janela o tubo solar. Para esta análise é usado como base o ambiente real da casa 1.0 do centro politécnico da UFPR, considerando esta vez a janela que está presente no local.

O processamento dos resultados é similar à da etapa anterior. Neste caso foram geradas 480 tabelas. Com base nestas comparações, serão propostas as adaptações e modificações para a configuração do protótipo. A apêndice 4 mostra as tabelas resumidas e organizadas pelos três tipos de céu tomados de acordo com a classificação da CIE (2003), cada tabela apresenta os valores das iluminâncias calculadas para a zona de análise 1. Estas tabelas mostram também a comparação dos valores com e sem o duto de luz solar no ambiente.

De acordo com os resultados da etapa anterior, prosseguiu-se com a simulação do tubo reto, eleito na fase prévia no ambiente virtual com as características reais onde seria instalado o tubo de luz, neste caso, foi considerada a janela. Para fazer a previsão do desempenho real do tubo de luz, estes resultados têm sido usados como dados para fazer uma análise de economia de energia e estimativa de payback, como também para fazer adaptações finais no design do protótipo final.

Este ambiente real onde foi instalado o tubo, tem 29 % de PJF (percentual de janela na fachada), as dimensões da janela são 1.5 x 1.2 metros, a transmitância da janela é de 0.88. Para esta etapa foram consideradas duas zonas, estas zonas estão separadas de

acordo com a malha dos pontos de análise usados no software. As características geométricas desta sala estão na Figura 35.

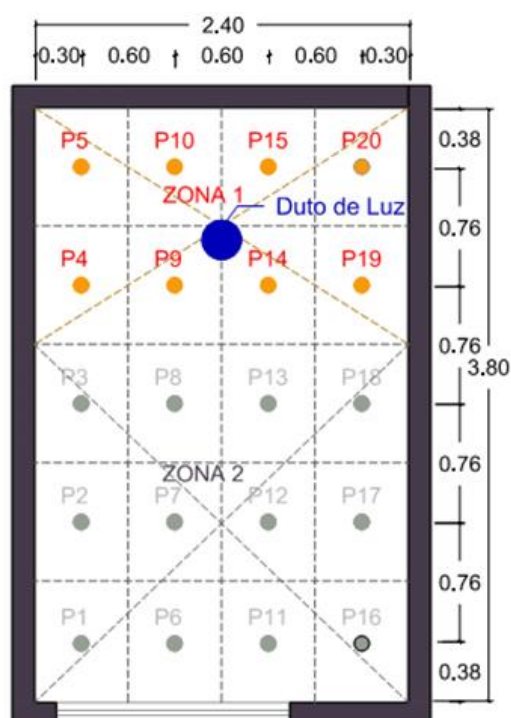


Figura 35. Dimensões da sala e zonas de análise

Para este caso foi de maior importância analisar a zona 1 (Figura 35), onde a iluminação que é entregue pelo tubo tem mais influência, além disso a zona 2 teria nos resultados valores das iluminâncias mais elevados, devido principalmente à iluminação distribuída através da janela. Os resultados estão organizados, mediante uma comparação dos três tipos de céu para cada uma das quatro datas simuladas, que correspondem às estações do ano.

A análise comparativa do desempenho lumínico no ambiente com e sem duto de luz solar, considerando ambas as zonas (Figura 35), tem sido publicado num artigo científico. Por não ser o objetivo de esta fase de simulações, na presente pesquisa, não está se considerando estes resultados.

Os parâmetros ambientais e as características dos materiais do duto e a sala são os mesmos que os utilizados na etapa anterior, considerando, nesta etapa a transmitância da janela localizada no ambiente.

4.4.1 Comparação das iluminâncias para os equinócios, nos céus 5 – céu coberto, 10 – céu semicoberto e 15 – céu claro.

Para o equinócio de outono, as iluminâncias do ambiente com a janela e o duto, na zona 1, apresenta alguns valores elevados em determinados horários, acontecendo isto com maior

ênfase, para os céus 10 - semicoberto e 15 – céu claro. Um acontecimento similar é observado no equinócio de Primavera (Figura 36).

Deve-se observar que a referência para as iluminâncias mínimas exigidas, de acordo com a norma técnica NBR 8995 (ABNT, 2013) utilizada neste caso é de 300 lux. Para evitar a iluminação excessiva e ofuscamento deve ser proposto um tipo de controle de luz no sistema de difusão.

Da mesma forma deve-se ter em consideração os valores baixos das iluminâncias em algumas horas para o caso de céu 5 – céu coberto, em ambas as datas. Para isto é preciso recomendar no sistema de difusão, um dispositivo que ajude a redirecionar a luz para as zonas de trabalho a ser utilizadas. A Figura 36 mostra os valores das iluminâncias para as horas simuladas nos equinócios.

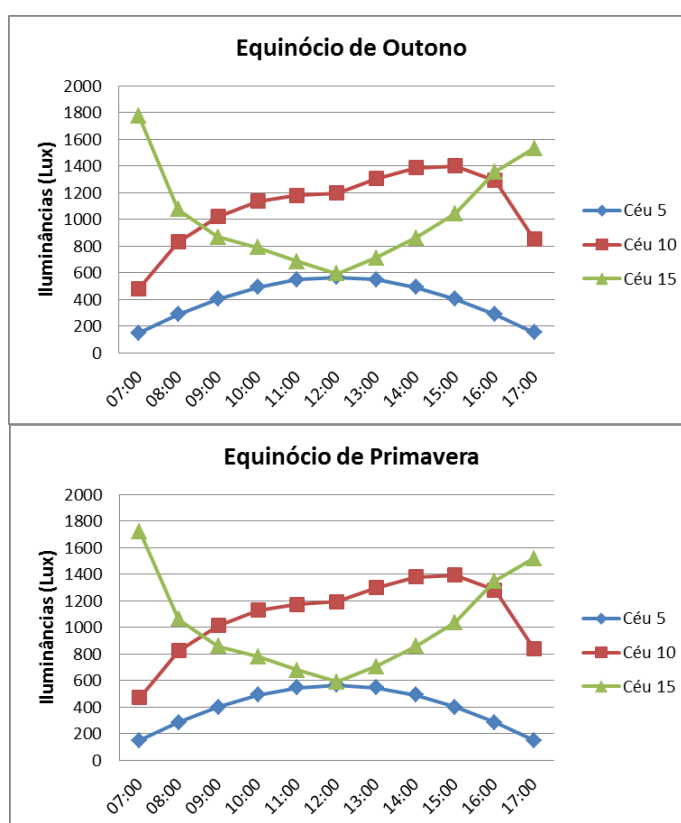


Figura 36. Valores das iluminâncias internas para os equinócios nos três tipos de céu

4.4.2 Comparação das iluminâncias para os solstícios, nos céus 5 – céu coberto, 10 – céu semicoberto e 15 – céu claro

Para o solstício de inverno, no céu 5 – céu coberto, as iluminâncias apresentam valores baixos em determinados horários. Considerou-se as iluminâncias de 300 lux como a mínima requerida pela norma, como explicado anteriormente. Para os céus 10 e 15 os valores são mais elevados (Figura 37). Por esta razão, é necessário considerar no sistema de difusão,

um dispositivo para redirecionar a luz natural a planos de trabalho onde se precise iluminação adicional.

No solstício de verão as iluminâncias para os céus 10 e 15, são os mais elevados em comparação com as outras datas. Neste caso para evitar a iluminação excessiva e ofuscamento deve-se propor um tipo de controle de luz no sistema de difusão, como mencionado anteriormente.

O dispositivo para redirecionar a luz para as zonas de trabalho a ser utilizadas, também ajudaria para evitar a iluminação solar direta concentrada no plano inferior do tubo de luz. Esta luz adicional deve ser aproveitada para zonas onde por diferentes motivos a luz natural não atinge as iluminâncias mínimas requeridas. Da mesma forma, também deve-se considerar um dispositivo que diminua o nível de luz no difusor. A Figura 37 mostra os valores das iluminâncias para as horas simuladas nos solstícios.

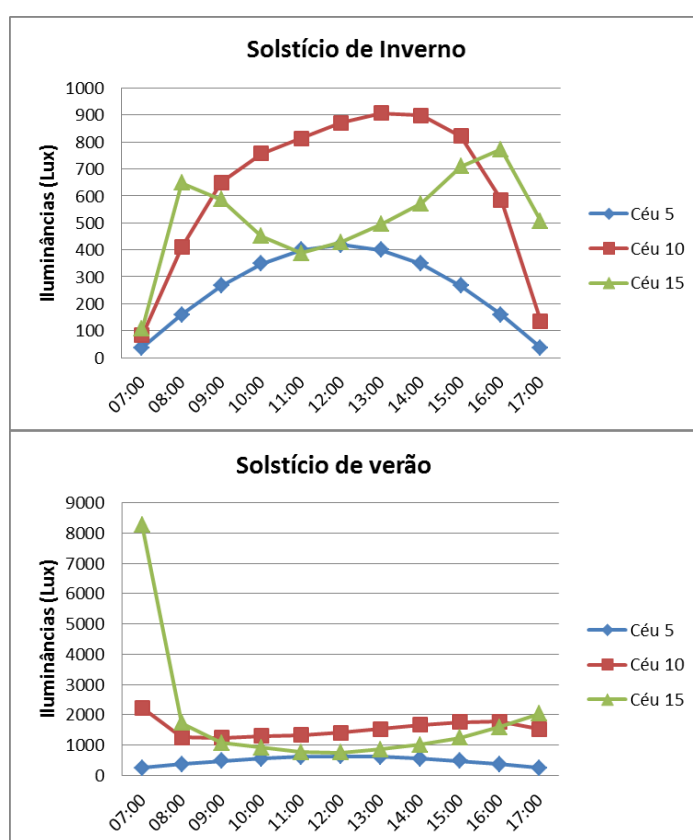


Figura 37. Valores das iluminâncias internas para os solstícios nos três tipos de céu.

4.4 Proposta de Adaptações para a Configuração do Protótipo

Com base nas duas fases de simulações anteriormente desenvolvidas e os parâmetros revisados na literatura técnica nacional e internacional, foi possível determinar as considerações paramétricas necessárias para o desenvolvimento do protótipo, na seguinte fase. As duas fases, tanto a comparação do desempenho dos dutos solares, como a simulação no ambiente real de uso, foram determinantes para a proposta final de cada uma das peças componentes do tubo de luz solar. O quadro 9, ilustra as principais considerações e parâmetros para a configuração real do protótipo.

Parâmetros para a configuração do protótipo	
Parâmetro	Recomendações
Geometria	Protótipo a ser configurado, de geometria reta, por ser o mais eficiente ao longo do ano, de acordo às simulações.
Coletor e base	Base para o telhado de alumínio, coletor de alta transmitância Para reduzir o custo total do protótipo, será considerado um corte na parte superior do tubo – orientar este corte ao norte.
Tubo de transporte de luz	Feito com chapa de alumínio de espessura mínima – transmitir o mínimo peso à estrutura.
Sistema de Transporte de luz	Utilizar um material com alta refletividade, com igual o maior refletividade ao utilizado nas simulações.
Difusor	Devido ao resultado das simulações nas condições ambientais do local de instalação, deve ser feito um sistema de controle de luz. O difusor deve ter alta transmitância para os dias de pouca eficiência lumínica.
Sistema de Controle de Luz – Parâmetros com base às simulações	
Dispositivo de fechamento de Luz	Para as datas e horários onde a luz da janela é suficiente para atingir com a iluminação necessária.
Controle parcial de Luz	Um sistema de controle que inclua um elemento óptico com menor porcentagem de transmitância de luz para os horários e data onde a luz natural é necessária, mas precisa-se de algum tipo de controle.
Mecanismos de redirecionamento de Luz	Elemento revestido com material de alta refletância que foca a luz adicional a diferentes planos de trabalho, quando necessário. Dois mecanismos, podem ser propostos com diferentes geometrias, para otimizar a eficiência do nível de iluminação, cada um destes estaria acorde com o nível de iluminâncias para determinadas horas e datas.
Forma de Manipulação do sistema de controle	Para reduzir o custo do protótipo deve-se considerar um mecanismo simples de manipulação.

Quadro 9. Proposta de parâmetros e adaptações para a configuração real do protótipo

4.5 Considerações Finais

No presente capítulo, foram apresentados os resultados das simulações do desempenho dos dutos de luz solar, para determinar qual é o tubo mais eficiente para ser configurado na seguinte etapa. O tubo solar reto foi selecionado por ser o mais eficiente nas diferentes datas e tipos de céu simulados.

Da mesma forma apresentou-se os resultados das simulações do desempenho do tubo selecionado no ambiente real de uso. A partir dos resultados da simulação, foi possível definir os parâmetros a serem considerados na configuração final do protótipo.

Na segunda etapa da fase de simulações, em ambiente real de uso, foi observado valores altos, no verão. Estes valores, podem ser devido ao margem de erro das simulações. Embora as simulações servem como ferramenta de apoio no momento da pré-configuração do produto, existem estas porcentagens de erro para qualquer programa de simulação, que também deve ser considerado ao momento de analisar os resultados.

Também deve ser considerado que os parâmetros geométricos e ambientais utilizados nas simulações, correspondem aos da casa de teste onde será instalado o protótipo. Este fator influencia nos resultados obtidos. Observa-se que os resultados são similares aos encontrados na literatura; por esta razão, não foram testados parâmetros diferentes para fazer mais comparações.

O principais parâmetros propostos a partir das simulações, correspondem ao sistema de controle de luz. Este sistema está proposto para melhorar a eficiência do protótipo, otimizando o desempenho nos momentos de baixo nível de iluminação; e regulando e aproveitando a luz adicional transmitida pelo duto de luz.

No seguinte capítulo com base a estes parâmetros propostos será apresentado a configuração do protótipo. Da mesma forma, será analisado o desempenho dos componentes do duto de luz em diferentes situações e variáveis de iluminação.

CAPITULO 5 – PROTOTIPAGEM E ANÁLISE PÓS-INSTALAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os processos de configuração e instalação do protótipo do duto de luz solar, tendo como base os resultados da etapa anterior de simulações. Em seguida é apresentada a análise do desempenho lumínico do protótipo, com diferentes dispositivos de controle de luz, realizada na etapa de pós-instalação do protótipo. A partir destas medições é feita uma estimativa de payback com base nas medições em ambiente real de uso.

De acordo com a etapa anterior foi determinado que o duto de luz solar selecionado para ser configurado é o tubo de geometria reta. O protótipo do duto solar foi elaborado manualmente, no caso das peças correspondentes ao material de alumínio. Para algumas das peças plásticas do sistema de controle de luz foram utilizadas máquinas CNC.

Para explicar todos os componentes do protótipo e sua forma de desenvolvimento é dividido o conjunto de peças correspondentes a cada parte do sistema: Coletor e base; sistema de transporte de luz, sistema de difusão de luz e sistema de controle de luz (Figura 38).

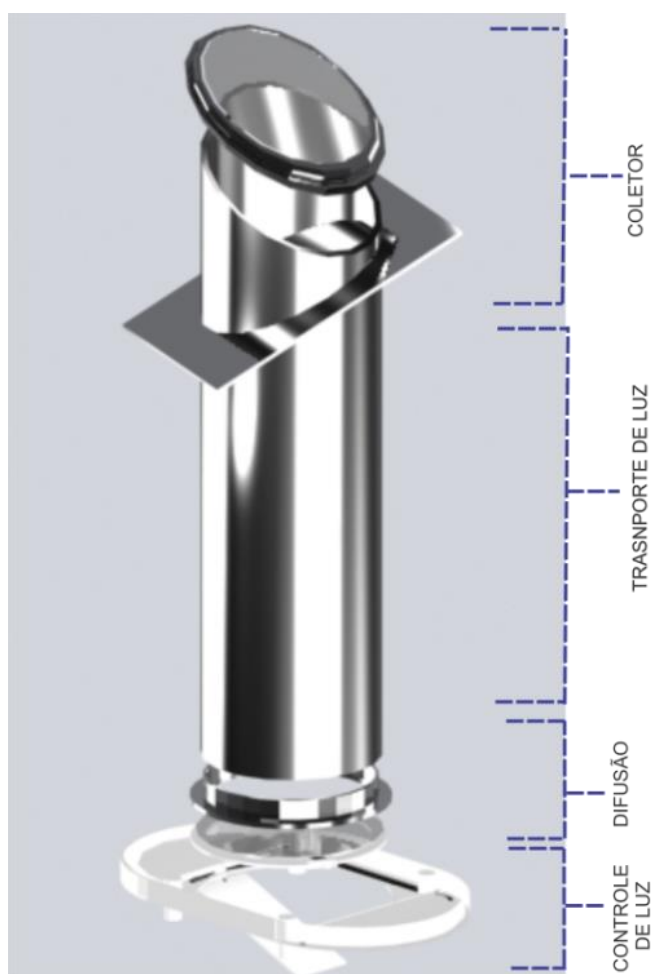


Figura 38. Componentes do tubo de luz solar

Fonte: A autora

5.1 Componentes do Duto de Luz Solar

5.1.1 Coletor e base do sistema

O duto de luz solar, precisa de uma base no telhado, para segurar a peça do coletor, neste caso foi configurada uma base com as mesmas medidas de uma das telhas. A medida desta base é de 32.5 x 42 cm. Esta base teve no momento da instalação uma inclinação de 30° , que é a mesma inclinação do telhado.

Tanto na união do tubo e base de alumínio foi utilizada uma vedação, também foi utilizada esta vedação entre a base e o telhado para evitar possíveis infiltrações de água dentro da casa. Ao utilizar o mesmo material no tubo e na base, foi favorecida a adesão entre ambas as peças. Na parte superior do tubo solar está localizada a peça do coletor, para unir e encaixar esta peça com o tubo de alumínio foi utilizado um anel de alumínio, com as dimensões da elipse do coletor.

O coletor é uma elipse com as seguintes dimensões: 28 x 26 cm, o material correspondente é o policarbonato translúcido com proteção UV, o material utilizado neste caso não é policarbonato reciclado, para não diminuir a eficiência de transmissão de luz do tubo. Todas estas peças estão representadas na Figura 39. A tabela 12 apresenta as características dos materiais usados em cada uma das peças componentes.

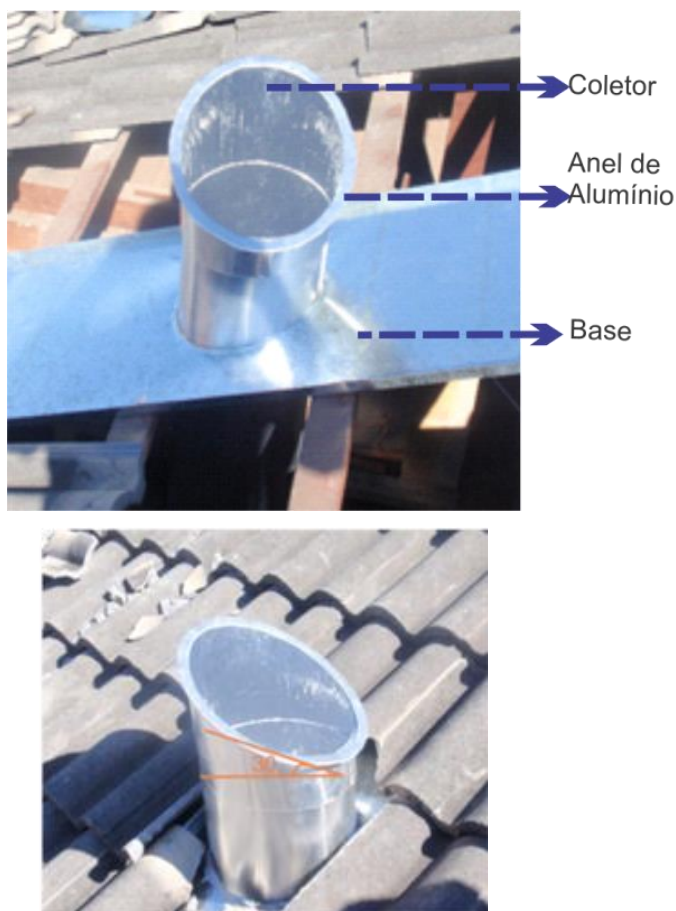


Figura 39. Peças da base do sistema e coletor
Fonte: A autora

Tabela 12. Características dos materiais utilizados no coletor e base do sistema

Peça	Material	Espessura	Transmitância
Base para o telhado	Alumínio	7mm	-----
Anel do coletor	Alumínio	7mm	-----
Coletor	Policarbonato translúcido	2 mm	89 %

5.1.2 Sistema de Transporte de luz

O tubo de transporte de luz, como explicado no capítulo 2, deve ser de baixo peso e não transmitir uma carga considerável à estrutura do telhado. O tubo utilizado para o protótipo é de alumínio e possui uma espessura de 7mm.

As dimensões do tubo são de 95 cm de comprimento na parte mais baixa e 105 cm de comprimento na parte alta, a inclinação na parte superior foi efetuada para orientar o coletor para o norte e evitar o uso de um domo, que incrementaria o custo final do protótipo (Figura 40).

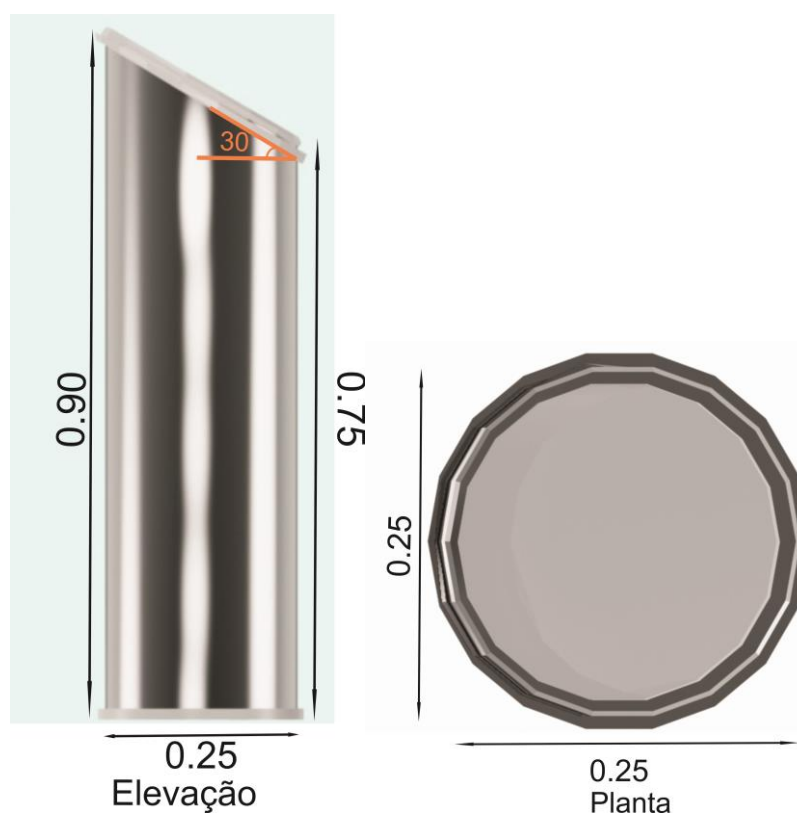


Figura 40. Dimensões gerais do tubo de alumínio

Fonte: A autora

Durante a simulação o tubo 1, eleito, foi configurado de forma totalmente reta, sem apresentar nenhuma angulação no coletor, devido a que o programa Troplux não processava os resultados com o coletor inclinado, mas neste caso decidiu-se inclinar o coletor para o

norte em 30° , para maximizar a captação de luz, como explicado no capítulo 2. O diâmetro do tubo é de 25 cm.

Para a configuração do tubo, foi utilizada uma chapa de alumínio, e esta chapa foi dobrada e fechada em forma circular, para este processo foram utilizadas uma máquina dobradeira, uma calandra e uma fresadeira. Este processo está representado na Figura 41. Antes de fazer esta dobra foi colada uma lâmina mylar® de 95 % de refletância ao interior da chapa, esta lâmina tem uma alta porcentagem de refletividade, fator importante para o desempenho do tubo.



Figura 41. Dobra de chapas no processo de fabricação do protótipo. Fonte: A autora

5.1.3 Sistema de Difusão de Luz

A parte inferior do tubo está formada de três componentes: O anel para encaixe de alumínio, o anel de acrílico e o difusor de policarbonato. O anel para encaixe no forro tem como principal função segurar o anel de acrílico onde estará a peça circular de policarbonato. A peça de policarbonato tem 26 cm de diâmetro, tanto o anel de acrílico como o círculo de policarbonato foram cortados a laser, foi feita uma dobragem na peça do anel de acrílico para poder colocar o anel de alumínio e o difusor. Estas peças estão expostas na figura 42. A tabela 13 apresenta as características dos materiais usadas para as três peças.



Figura 42. Peças da parte do difusor do tubo solar.

Fonte: A autora

Tabela 13. Características dos materiais utilizados na parte das peças do difusor

Peça	Material	Espessura	Transmitância
Anel do forro	Alumínio	5 mm	
Anel do difusor	Acrílico	3 mm	
Difusor	Polícarbonato translúcido	2 mm	89 %

5.1.4 Sistema de Controle de Luz do Difusor

Para controlar o nível de iluminação ao interior do ambiente da casa de teste foram determinados três dispositivos de controle, estes controles são manipulados manualmente. O primeiro controle pertence ao dispositivo de fechamento da entrada de luz, o segundo corresponde ao controle parcial do nível da luz e o último dispositivo pertence ao controle de direção de luz natural.

O dispositivo de controle de entrada de luz parcial e o dispositivo de fechamento estão dentro de uma peça de acrílico que tem pequenos acessórios para conseguir manipular os mesmos. Estes acessórios são movimentados pelos usuário através de um bastão de polipropileno de 1 metro. O bastão de polipropileno seria uma peça que formaria parte do todo este sistema de iluminação natural. Todas as peças juntas estão expostas na Figura 43.



Figura 43. Todas as peças do sistema de controle de luz. Fonte: a autora.

A peça de acrílico mostrada na figura é de 4 mm de espessura e as dimensões são: 0.32 x 0.62 m, para sua manufatura foi utilizada uma máquina CNC onde foi cortada a peça a laser, foi moldada uma linha do mesmo acrílico para obter uma altura de 4.5 cm onde estão todos os dispositivos de controle de luz e finalmente foram unidas estas duas peças. As outras peças de controle de luz, os semicírculos foram cortados também a laser.

5.1.4.1 Dispositivo de fechamento da entrada de luz

Este dispositivo tem como função fechar a entrada de luz do difusor, este sistema seria usado para os casos de não se precisar a luz adicional entregue pelo tubo, nos momentos que poderia se causar ofuscamento ou outro tipo de desvantagem da luz natural. Este sistema consta de duas peças de acrílico de 4 mm com forma de semicírculos, e na parte extrema estão fixados à parte superior do acessório de controle (Figura 44).



Figura 44. Peças para o fechamento da entrada de luz
Fonte: A autora

5.1.4.2 Controle de luz parcial

Este sistema consta de duas peças semicirculares de acrílico branco leitoso de 2mm, com transmitância de 50 %, na parte extrema estão fixadas à parte superior do acessório de controle. A função principal deste sistema é regular o nível de luz, no caso de iluminação excessiva que cause desconforto nos usuários, mas ainda através do uso deste controle, possa-se permitir a entrada de luz, devido a possuir um nível de transmitância considerável. Todas esta peças estão expostas na Figura 45.



peças de acrílico branco leitoso

Figura 45. Peças do sistema de controle de luz parcial
Fonte: A autora

5.1.4.3 Controle de direcionamento de luz natural

Este controle tem como função permitir redirecionar a luz natural de acordo com o lugar que o usuário ache necessário, dependendo da intensidade de luz na saída do difusor. Esta peça não está fixada no dispositivo de controle, é um elemento opcional que pode ser colocado na parte inferior de acrílico de acordo com a necessidade do usuário. Neste caso foram propostos e indicados dois dispositivos de redirecionamento de luz.

A primeira é uma peça de acrílico de 10 cm x 20 cm e pode ser instalada em qualquer das duas aberturas do sistema de acrílico. Foi dado um ângulo de 30° com relação ao eixo y. A segunda peça tem maiores dimensões, devido ao fato da necessidade de abranger mais área da entrada de luz, no difusor, para redirecionar esta luz às áreas desejadas. Para esta peça foram dadas duas angulações: A primeira parte tem as seguintes dimensões: 25 x 25 cm, possui uma angulação de 30° com relação ao eixo y. A segunda parte está inclinado em mais um ângulo de 30° com relação ao eixo y, as dimensões são de 25 x 15 cm. Esta peça é também de acrílico e está revestida com um adesivo, uma lâmina mylar® com 95 % de refletância. Procurou-se não se utilizar materiais de muito peso para a configuração destes dispositivos. A Figura 46 ilustra estes dois dispositivos.



Figura 46. Dispositivo de controle de luz.

Fonte: A autora

A forma de manipulação de todos os dispositivos no sistema de controle de luz, conforme explicado, foi com um bastão de polipropileno, a movimentação é feita de forma manual. Esta manipulação foi proposta de forma de não fazer um esforço considerável durante o uso.

O processo de instalação do tubo de luz foi organizado em forma de manual instrutivo, o qual está detalhado e organizado em passos a seguir: Instalação do coletor, do tubo, difusor e de sistema de controle; as figuras 47 e 48 ilustram em detalhe o processo de instalação do sistema.



Figura 47. Etapas do processo de instalação – Passo a Passo – parte 1



Figura 48. Etapas do processo de instalação – Passo a Passo – parte 2

5.2 Orçamento Final do Protótipo do Duto de Luz Solar

Projeta-se como orçamento final deste duto o valor de 350 reais (\$), este seria o preço ao ser comercializado incluindo a instalação do duto de luz solar. Cada uma dos componentes e peças estão detalhados com seus respectivos custos na tabela 14.

Tabela 14. Orçamento final para o produto ao ser comercializado

Peça	Custo (Reais - \$)
Peças de Alumínio	200.00
Peças de Policarbonato	20.00
Peças de acrílico	40.00
Produção e Instalação	90.00
Preço Final	350.00

Para o caso que o duto de luz tivesse o sistema de controle de luz completo, o sistema teria um custo mais elevado, incrementando o preço total em 70 % (Figura 15). Estes preços são relativos ao contexto atual da pesquisa e servem só como uma referência de custo para este protótipo.

Tabela 15. Orçamento final com e sem o sistema de controle.

Peça	Custo (Reais)
Preço do Tubo de Luz solar sem sistema de controle de luz	350.00
Preço do Tubo de Luz solar com sistema de controle de luz	500.00

5.3 Análise Pós-Instalação: Desempenho Lumínico do Protótipo com o Sistema de Controle de Luz.

As medições efetuaram-se durante os meses de junho, julho e agosto, desta forma foi realizado um próprio esquema para estas medições baseado nos métodos desenvolvidos por Souza (2005); Paroncini; Calcagni e Corvaro (2007); Mohelnikova (2009) e Li et al (2010).

Os dias tem sido escolhidos de acordo com os tipos de céu, ao igual que na etapa anterior das simulações, foram considerados três tipos de céu: claro, semicoberto e coberto. Para os dias de céu coberto, as medições realizadas correspondem a dias com chuva e sem chuva. O período de horas de medição varia das 7 horas até às 16.00 horas. A tabela 16 resume de forma geral os tipos de céu do dia onde foram efetuadas as medições.

Tabela 16. Dias e tipos de céu das medições realizadas

Tipo de céu	17-06	18-06	24-06	25-07	28-06	02-07	03-07	08-07	10-07	13-07	17-07	19-07	05-08	TOTAL
Claro					x					x	x			3
Coberto com chuva			x	x								x		3
Coberto sem chuva								x					x	2
semicoberto	x	x				x	x		x					5

Fonte: A autora

Para as medições foram considerados 4 pontos de análise, num plano de trabalho a 75 cm sobre o nível do solo, esta escolha foi realizada devido principalmente a uma simplificação durante o processo no esquema de medições (Figura 49). Estes pontos são equidistantes e estão localizados no eixo central y da sala de teste. Estes 4 pontos facilitavam as medições porque contava-se com 4 luxímetros disponíveis, como mencionado no método.

A razão da escolha destes pontos foi também para organizar os resultados nas diferentes etapas, agrupando os valores das iluminâncias nos pontos de acordo à análise a ser realizada. Observa-se que o ponto 1 e 2 estarão mais influenciados nos níveis de iluminação pelo protótipo do duto de luz solar. Assim, os pontos 3 e 4 receberão mais iluminação da janela. No itens 5.3.1 e 5.3.2 serão detalhados estes valores nas diferentes avaliações.

Também foi registrada a iluminância global nos dias que foram efetuadas as medições, nos mesmos horários que gravavam-se as iluminâncias internas. Este dado é importante ao momento de calcular a quantidade de luz a ser transmitida através do tubo, para poder calcular a eficiência de transmissão de luz do sistema.

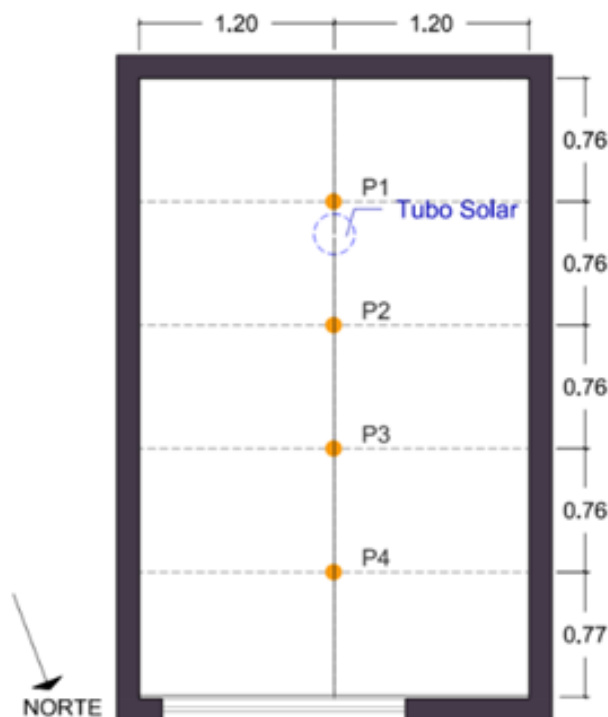


Figura 49. Pontos de medições na sala de teste

5.3.1 Incremento das iluminâncias nos 4 pontos analisados com o sistema de Controle de Luz

Com base a todas as medições realizadas foi analisado o incremento das iluminâncias para os 4 pontos onde realizaram-se as medições (Figura 49), para simplificar esta análise foram eleitas três horas do decurso de horas simuladas. Os dias foram agrupados de acordo aos 3 tipos de céu: dias de céu encoberto, semicoberto e claro. Esta porcentagem de incremento refere-se a quanto aumenta o valor da iluminância interna para cada ponto analisado em comparação com o difusor fechado e a iluminação entregue só pela janela, isto é em duas situações: o incremento das iluminâncias com o difusor de policarbonato transparente claro e o difusor de acrílico leitoso semitransparente. As tabelas 17, 18 e 19 mostram esta porcentagem de incremento para os horários e dias eleitos.

Para todos os tipos de céus e casos, as maiores porcentagens de incremento são observadas para o ponto 1. Da mesma forma, este incremento diminui em direção ao ponto 4. A tabela 17, para o céu claro, mostra as porcentagens de incremento, para às 12 horas, 13h30m e às 15h30m, nos dias 28 de junho, 13 de julho e 17 de julho, dias eleitos e horários eleitos para este tipo de céu. O maior incremento atingido é de 80 % para o difusor com maior transmitância e de 47 % para o difusor semitransparente.

Tabela 17. Porcentagem de acréscimo para o tipo de céu claro

Horas	Pontos de análise	Céu Claro					
		28-Junho		13-julho		17-julho	
		difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)
12. 00	p1	66	47	37	25	38.5	24.3
12. 00	p2	6.7	1.4	18	14.7	26.7	18.8
12. 00	p3	53.1	19.1	6.3	4.4	28.8	24.5
12. 00	p4	1.92	0.96	3.4	1.1	12.4	11
13. 30	p1	80	28.6	30.4	16.2	51.1	31.6
13. 30	p2	37.1	11.4	25.4	15.4	30.1	8.1
13. 30	p3	28.2	25.5	29.5	23.5	9.2	6.5
13. 30	p4	7.4	5.3	23.5	8.7	8.8	2.1
15. 30	p1	23.53	11.7	39.3	21.4	22	9.8
15. 30	p2	16	12	26.4	19.8	33.3	17
15. 30	p3	36.2	10.6	4	9.3	15.2	8.2
15. 30	p4	47.5	46	5.1	5.1	12.5	10

Tabela 18. Porcentagem de acréscimo para o tipo de céu semicoberto

Horas	Pontos de análise	Céu Semicoberto					
		2-julho		3-julho		10-julho	
		difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro (%)	difusor semi-transparente (%)
12. 00	p1	130	32	125	50	32.7	16.8
12. 00	p2	59	35.2	30.7	7.8	24.7	17.2
12. 00	p3	14.3	1.6	2.1	1.1	21.1	9.9
12. 00	p4	16.6	0	4.1	1.8	25.5	23.8
13. 30	p1	118.8	45.8	72.5	20.8	86.3	35.3
13. 30	p2	61.3	28	26.8	7.3	34.6	20.8
13. 30	p3	35.5	33.3	8.8	7.2	16.8	2.5
13. 30	p4	12.61	2.5	8.3	1.6	6.7	0.5
15. 30	p1	68.9	27	89.1	32.4	46.7	16.7
15. 30	p2	45.4	27	41.6	1.6	38.5	20
15. 30	p3	20.83	16.6	9.1	2.7	18.7	15.8
15. 30	p4	12.8	2.6	2.67	0	9.4	2.2

Tabela 19. Porcentagem de acréscimo para o tipo de céu coberto

Horas	Pontos de análise	Céu Coberto							
		24-Junho		25-Junho		8-julho		19-julho	
		difusor claro	difusor semi-transparente(%)	difusor claro(%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro(%)	difusor semi-transparente (%)	difusor claro(%)	difusor semi-transparente(%)
12. 00	p1	150	53.3	150	50	84.5	31.6	81.8	36.4
12. 00	p2	50	22.85	30	5	27.7	8.3	27.4	12.9
12. 00	p3	15.8	5.3	7.7	3.8	7.8	2	8.8	4.4
12. 00	p4	3.4	0	1.3	0	12	7.8	1.3	2.5
13. 30	p1	118.7	40.6	113	26.7	70.9	20	50.8	39
13. 30	p2	42.9	14.3	23.5	17.6	23	7.7	34	11.6
13. 30	p3	15.4	10.25	3.33	0	8.1	2.7	6.3	5
13. 30	p4	5.9	5.1	2	1.64	1.4	0.5	8.6	4.7
15. 30	p1	105.7	34.3	100	28.9	102.3	48.8	66.7	25.6
15. 30	p2	100	55.5	25	5	52	17.8	33.9	16.1
15. 30	p3	10	5	3.7	3.7	15.1	6.1	6.3	2.5
15. 30	p4	4.8	2.4	0	0	5.7	4.8	2.4	2.4

Na tabela 18 estão os valores de acréscimo das iluminâncias para o tipo de céu semicoberto, aqui foram eleitos os mesmos horários do tipo de céu claro, observa-se nesta tabela que o maior valor de acréscimo pertence ao ponto 1 com 130 %, que corresponde ao difusor claro, e para o difusor semitransparente o acréscimo mais elevado é de 46%. Para o caso do tipo de céu coberto (Tabela 19) os maiores acréscimos são para o ponto 1 com até 150 % de acréscimo para o difusor claro e 56 % para o difusor semitransparente.

Em função da porcentagem de incremento observa-se que os melhores acréscimos são para o tipo de céu coberto, seguido pelo tipo de céu semicoberto e os valores mais baixos pertencem ao céu claro. Estes resultados são devido a presença da janela no ambiente, que contribui de forma significativa com a iluminação natural na sala. A figura 50 apresenta a média da porcentagem de acréscimo para cada tipo de céu nos horários anteriormente mencionados.

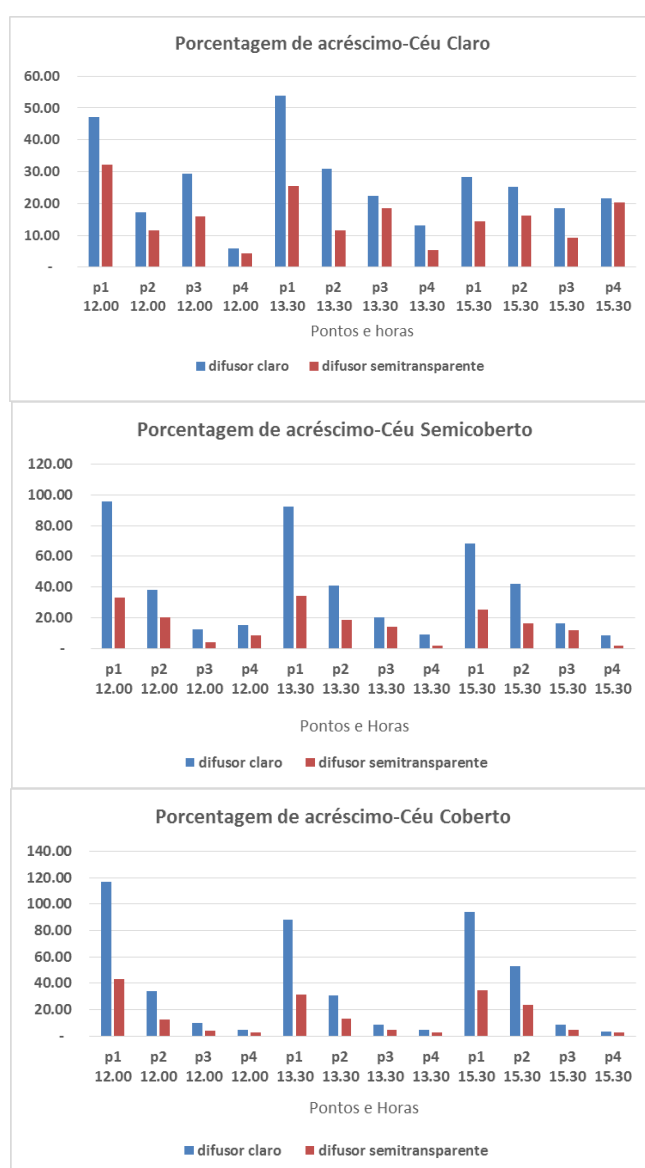


Figura 50. Média das porcentagens de acréscimo para os três tipos de céu

5.3.2 Análise Lumínica dos sistemas de Controle de Luz para o ponto 1

A seguir são apresentados os gráficos das iluminâncias para o ponto 1 analisado na sala de teste, como mencionado anteriormente dos 4 pontos usados para as medições, este ponto é o mais próximo ao tubo de luz, como meio de simplificação dos resultados, tem sido eleitos dois dias para cada tipo de céu. Em todas as figuras a serem mostradas a linha azul corresponde aos valores com o difusor fechado, a linha verde são aos valores com o difusor semitransparente e a linha vermelha são os valores com o sistema de controle de luz totalmente aberto e o difusor claro.

A figura 51 apresenta os níveis das iluminâncias no decurso do dia para o tipo de céu coberto, ambos os dias correspondem a dias de chuva; na parte direita das figuras apresentam-se os valores da luz natural exterior em relação com as iluminâncias internas do ambiente, observa-se os maiores incrementos das iluminâncias para o difusor claro nos horários perto ao meio-dia. Apesar de ser a condição ambiental menos favorável; observa-se para alguns horários, que ao usar o difusor claro de maior transmitância, pode-se melhorar consideravelmente o nível da iluminação.

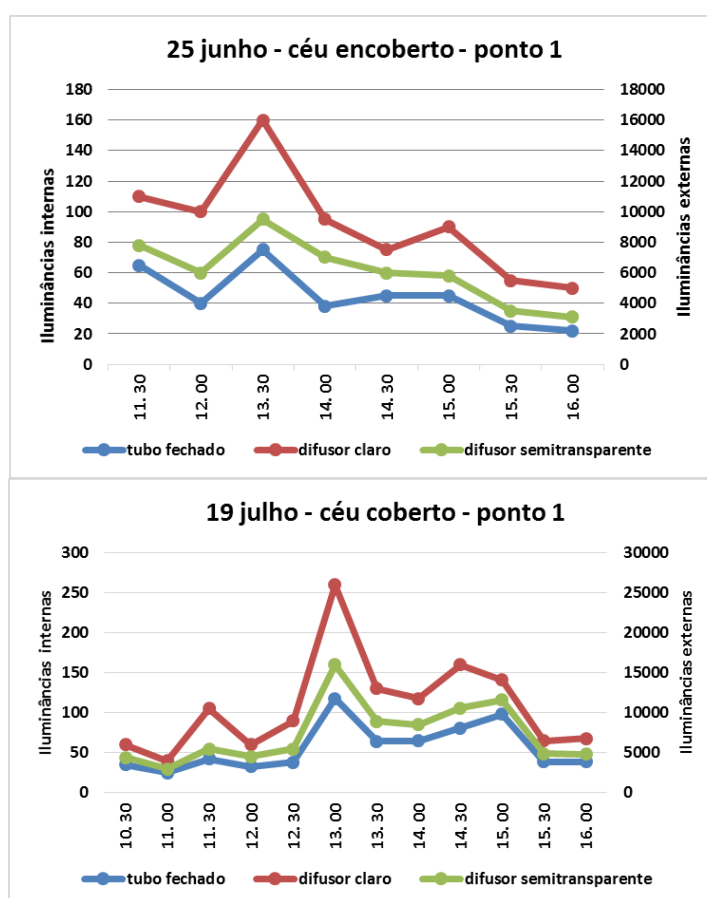


Figura 51. Iluminâncias para o ponto 1 no céu coberto.

Para o céu semicoberto (Figura 52), as iluminâncias interiores são mais elevadas em comparação ao caso anterior, na imagem mostra-se dois dias com disponibilidade de luz

natural exterior diferente, com maior e menor presença de nuvens; para alguns horários o aumento das iluminâncias é considerável com o uso do difusor claro. Como explicado no item 5.3.1 o acréscimo pode chegar até 130 %, este incremento ajuda a atingir a iluminação requerida para tarefas mais específicas no plano de trabalho.

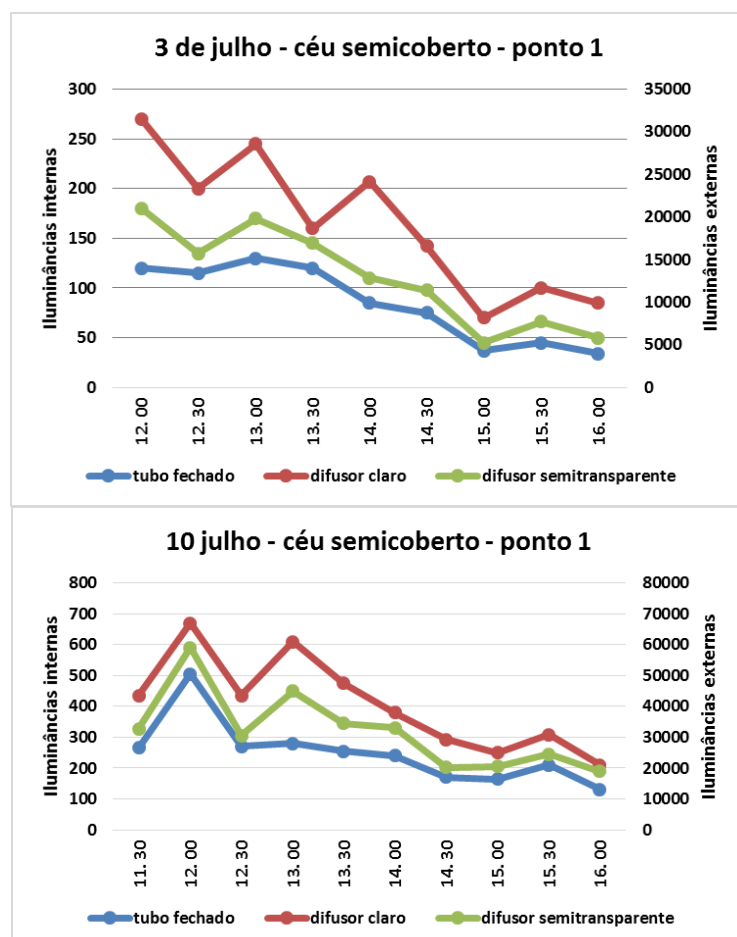


Figura 52. Iluminâncias para o ponto 1 no céu encoberto.

A figura 53 mostra as iluminâncias para o tipo de céu claro, neste caso as iluminâncias internas são as mais elevadas, em comparação com o caso anterior, devido às condições de céu. Como explicado no item 5.3.1, para alguns horários, as porcentagens de incremento são as menores, isto devido à presença da janela no ambiente. Nos dias que foram tomadas as medições, com o difusor claro (linha vermelha) as iluminâncias chegam até 650 lux.

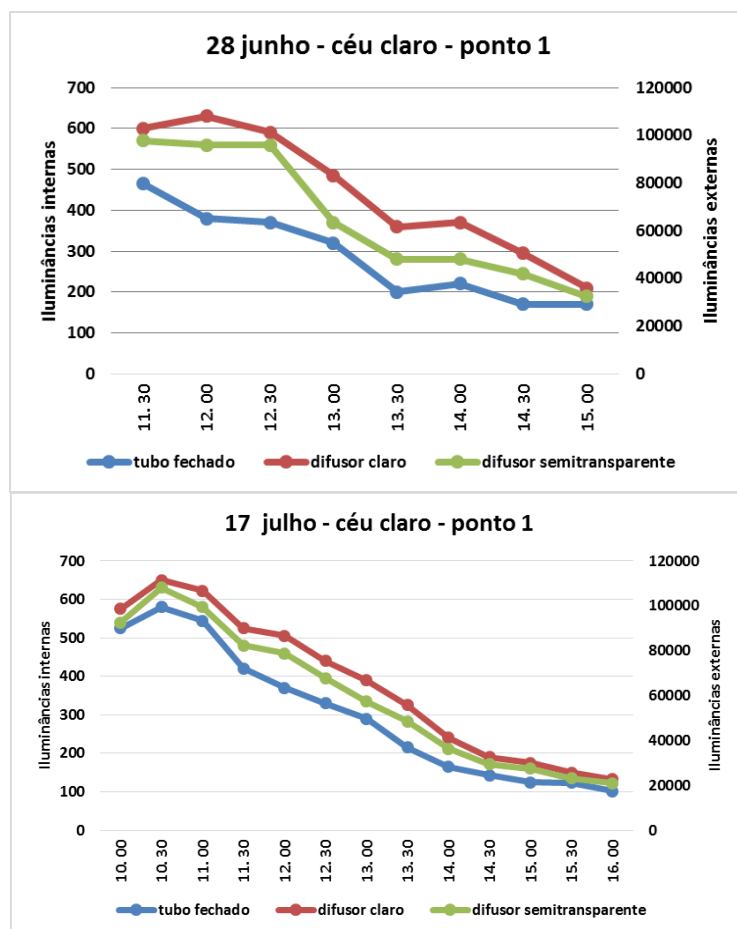


Figura 53. Iluminâncias para o ponto 1 no céu claro.

Observa-se para todos os casos anteriormente expostos a relação da luz natural do exterior para aumentar o nível dos valores das iluminâncias internas no ambiente analisado, independentemente da presença do duto de luz solar.

5.4 Análise das iluminâncias com dispositivos de redirecionamento de luz

Como explicado na primeira parte deste capítulo, tem sido desenvolvidos dois dispositivos de redirecionamento de luz, o dispositivo 1 (com menores dimensões) e o dispositivo 2 (de maior dimensão), os quais foram testados, no ambiente real de uso. Os registros das medições foram realizados em 3 pontos (P1, P2 e P3), à altura do plano de trabalho, a 80 cm do nível do piso.

O ponto 1 (P1) é o único que pertence ao ambiente de 2.4 m x 3.80 m, onde tem sido feitas todas as medições e análises (Figura 54), este é o ponto mais próximo ao tubo de luz, está localizado numa esquina a 15 cm de ambas as paredes. O ponto 2 está localizado perto do eixo x do tubo de luz solar, está também localizado numa esquina, a 15 cm de distância entre ambas as paredes. O ponto 3 é o mais afastado do tubo solar, e está a 15 cm de distância de uma das paredes da casa (Figura 54).

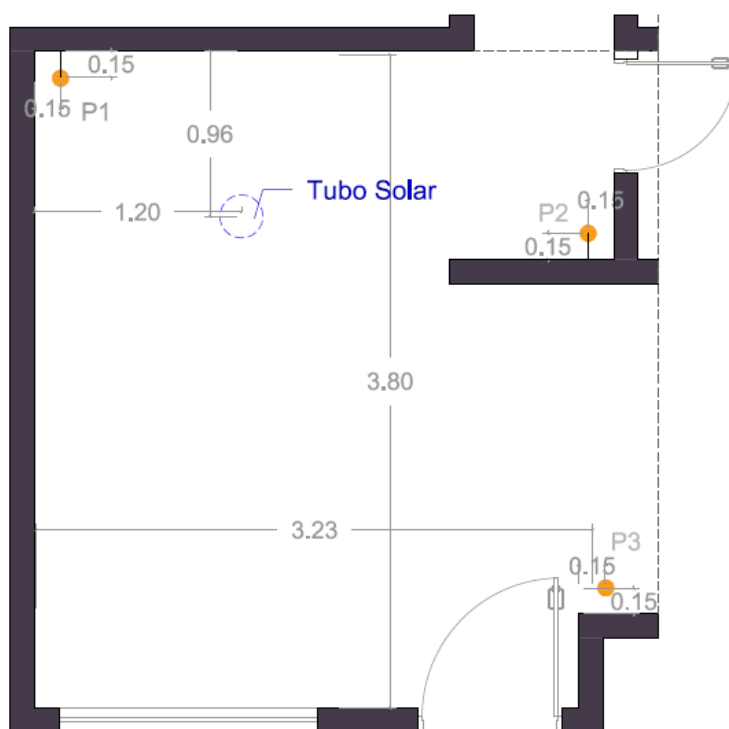


Figura 54. Ambientes da casa 1.0 com a ubicação dos 3 pontos de medições para os dispositivos de redirecionamento de luz.

A seleção dos três pontos na sala (Figura 54) foi conhecer os níveis das iluminâncias em três planos de trabalho diferentes com influência variável da incidência da luz. O ponto 1 recebe mais iluminação do duto de luz solar, e também recebe iluminação da janela. O ponto 2 está mais isolado e apenas recebe iluminação da janela, sendo o duto de luz o sistema do qual recebe maior iluminação. Os valores de iluminação ao serem registrados no ponto 3 serão mais influenciados pela presença da janela do que do duto de luz solar (Figura 54).

Os resultados tem sido organizados, ao igual que na fase anterior, de acordo aos três tipos de céu: claro, semicoberto e coberto, de todos os dias, foi calculada a média dos valores, para determinados horários, e assim são mostrados nos gráficos a seguir as iluminâncias nas três situações: Sem o uso de nenhum dispositivo, com o uso do dispositivo 1 e com o uso do dispositivo 2. Os resultados tem sido agrupados de acordo com os 3 pontos das medições, as barras verdes pertencem ao ponto 1, as barras em laranja ao ponto 2 e as barras azuis ao ponto 3, como mostrado na Figura 55.

Para o caso do céu coberto (Figura 55) os valores das iluminâncias internas são muito reduzidas e é onde os dispositivos tem o menor desempenho. O dispositivo 1 possui o desempenho mais baixo para aumentar as iluminâncias em todos os casos, e o aumento de iluminâncias através do dispositivo 2 é mais elevado, embora se obtendo resultados ainda baixos, para os três pontos analisados. A Figura 55, mostra a média dos valores para os dias e horas analisadas, neste tipo de céu.

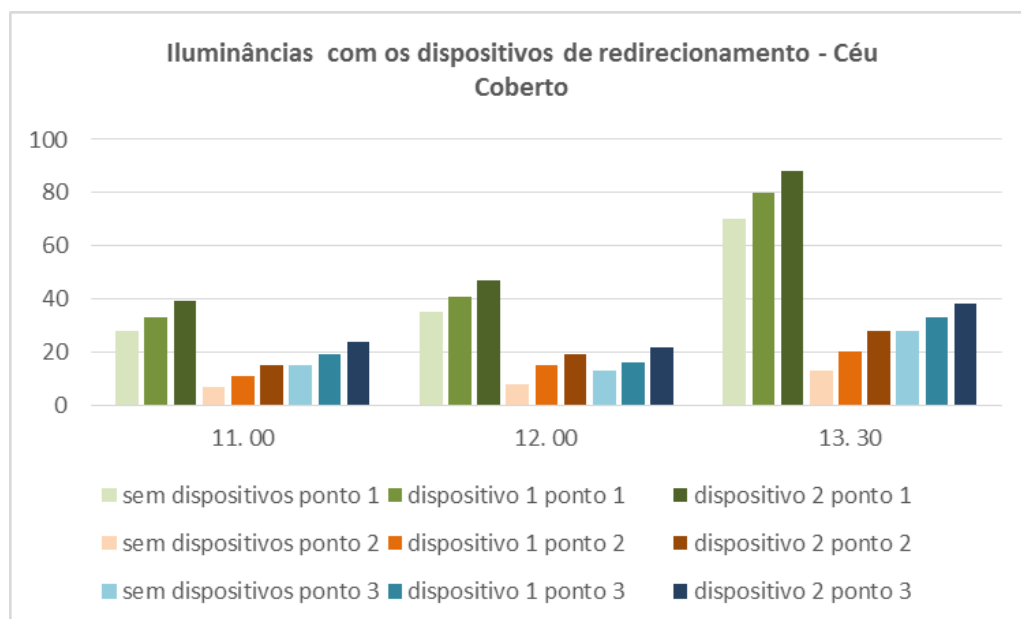


Figura 55. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu coberto

No céu semicoberto (Figura 56), o desempenho é melhor em comparação com o céu coberto, embora estes resultados diminuam consideravelmente ao final do horário diurno. Ao igual que na etapa anterior o dispositivo 1 não aumenta de forma considerável a iluminação, isto é, devido ao fato que o dispositivo 1 não abrange toda a luz que sai da área do difusor, a diferença do dispositivo 2. A Figura 56, apresenta os valores que pertencem à média para os dias e horas analisadas, no céu semicoberto.

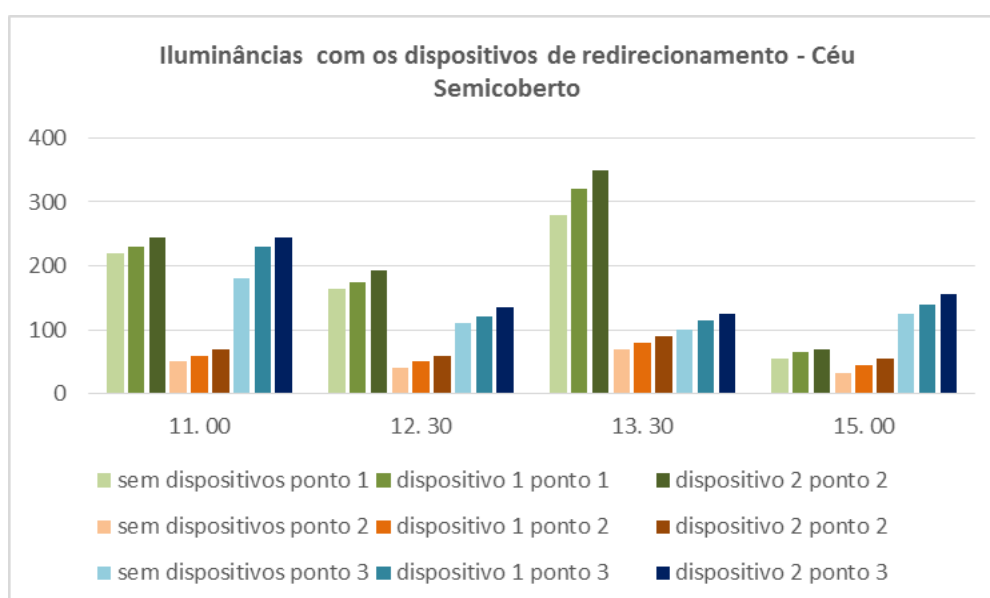


Figura 56. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu semicoberto

Para o caso do céu claro (Figura 57), os dispositivos de redirecionamento tem melhor desempenho, chegando a aumentar até em 115 lux o valor das iluminâncias às 12 horas, para o dispositivo 2 e para o dispositivo 1, aumenta-se as iluminâncias até em 60 lux. Este desempenho ao igual que nos dois casos anteriores diminui no decurso do dia. Os valores apresentados na Figura 57, pertencem à média para os dias e horas analisadas, neste tipo de céu.

Em todos os casos observam-se valores das iluminâncias mais elevados nos pontos 1, 3 e 2 respectivamente, independente do uso de qualquer dispositivo, isto é devido à distância dos pontos do tubo de luz solar e a presença da janela. O melhor desempenho a partir do uso dos dispositivos é observado para o ponto 1; o desempenho mais baixo é para o ponto 3. Da mesma forma observa-se a maior eficiência destes dispositivos nos momentos de luz solar direta, característica deste tipo de céu.

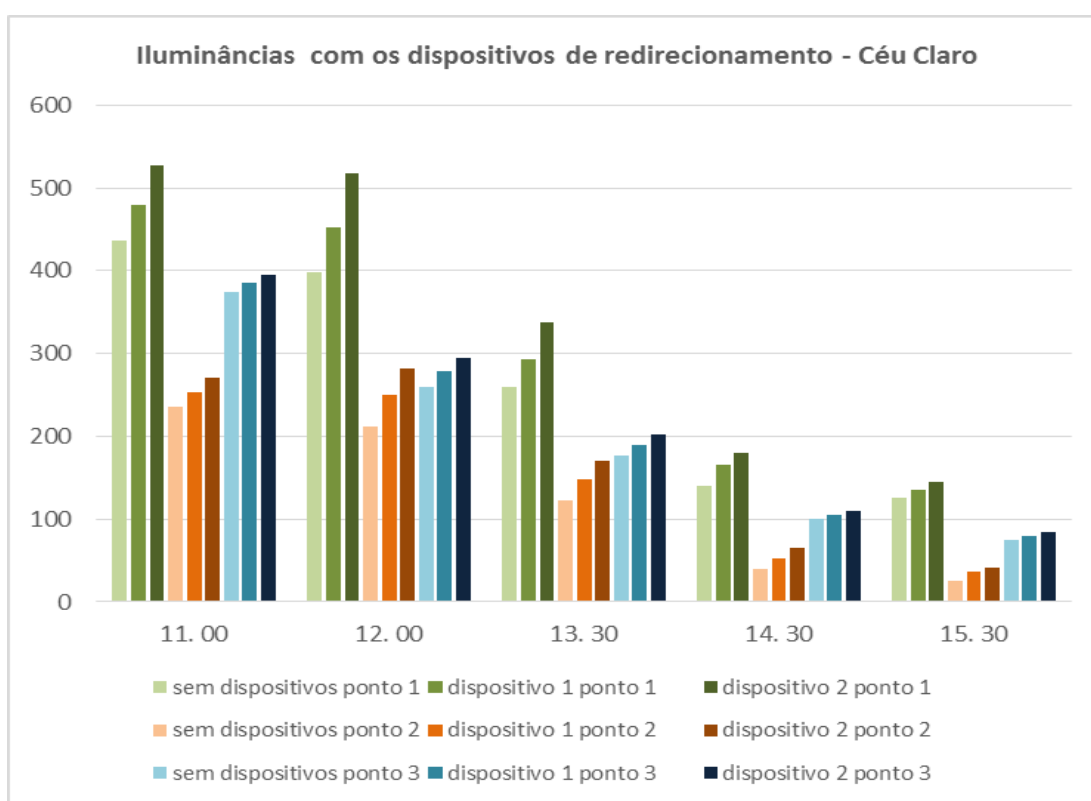


Figura 57. Iluminâncias com os dispositivos de redirecionamento de luz para o céu claro.

5.5 Desempenho da transmitância de luz do Protótipo Desenvolvido

Como mencionado no capítulo 3, foi calculada a eficiência de transmitância de luz para o sistema do tubo de luz solar, através do cálculo do fluxo luminoso que chega e sai do tubo de luz. Utilizou-se a seguinte fórmula:

$$t = \frac{F_{out}}{F_{in}}$$

Onde F_{in} é o o fluxo luminoso que chega ao tubo de luz e F_{out} é o fluxo luminoso saindo do tubos de luz. Estes valores estão em lumens. Ao momento de fazer os cálculos tem sido medidos a iluminância exterior e a iluminância interior na saída imediata do difusor, este último corresponde ao ponto 3 (P3), ambos os valores estão realçados em amarelo na tabela 22. A transmitância final calculada está realçada em verde na tabela. Para este caso, embora não foram usados no cálculo final, também foram registrados os pontos verticais P1 e P2 que correspondem às alturas de 0.80 m e 1.60 m no eixo vertical y do tubo de luz solar (tabela 20).

Os resultados estão organizados de acordo aos horários de registro e tipos de céu (Tabela 20), observa-se transmitâncias mais elevadas para os céus semicoberto e coberto, onde a luz natural é difusa chegando até 60 % de transmitância para o céu parcialmente coberto. Como observação deve-se considerar que os materiais usados para o coletor, lâmina de revestimento interna do tubo e o material do difusor, foram eleitos com limitações de tempo.

Tabela 20. Valores das iluminâncias para achar o nível de trasnmitância do duto de luz.

Dia	Tipo de céu	hora	E exterior	Iluminâncias para os pontos analisados			Transmitância
			lux	P1 (0.80 m)	P2 (1.60 m)	P3 (2.60 m)	F: Eex/Ein
5 julho	claro	14.00	64500	230	290	19800	0.31
13 julho	claro	12.00	90400	560	750	31900	0.35
17 julho	claro	10.00	54300	575	770	19810	0.36
17 julho	claro	12.00	93700	505	640	32800	0.35
17 julho	claro	15.00	61600	175	220	15100	0.25
2 julho	semicoberto	15.30	15400	160	240	6450	0.42
3 julho	semicoberto	12.00	29000	270	370	8200	0.28
10 julho	semicoberto	12.00	59400	670	800	35700	0.60
8 julho	coberto	12.00	25700	210	370	11000	0.43
19 julho	coberto	12.00	8190	60	150	3150	0.38
19 julho	coberto	13.30	15500	130	190	4820	0.31
5 agosto	coberto	12.00	27700	140	175	12270	0.44

5.6 Estimativa de Economia de Energia e Payback do sistema

5.6.1 Cálculo de Economia de Energia

O cálculo de economia de energia foi feito seguindo o método do PALN, estes resultados estão baseados nas medições efetuadas. Para fazer uma estimativa anual foram consideradas as tabelas com os dados de ocorrência de tipo de céu para a cidade de Curitiba, ao tomar os resultados das medições realizadas nos 3 tipos de céus: claro, semicoberto e coberto; foi possível fazer esta estimativa anual, baseado nos dados de ocorrência de tipo de céu, dos doze meses, em Curitiba.

Nesta etapa, foi utilizado o arquivo climático TRY de Curitiba, para calcular o PALN final ao longo do ano. O ano climático de Referência ou *Test Reference Year* (TRY), está formado de um arquivo com dados climáticos horários de um ano típico usado por softwares de simulação (PEREIRA et al, 2004). Esta frequência de tipo de céu, para todos os meses do ano, na cidade de Curitiba estão resumidos na Tabela 21.

Embora os dados climáticos são usados nas simulações, neste caso foram utilizados para poder ter uma estimativa da economia anual de energia, a partir dos dados obtidos nas medições; para de esta forma conhecer uma projeção futura de economia destinada à iluminação.

Tabela 21. Frequência de Ocorrência de Tipo de céu para Curitiba.

Mês	Céu Coberto	Parcialmente Encoberto	Céu claro
Janeiro	44 %	50%	6%
Fevereiro	51 %	47%	2%
Março	51 %	36%	13%
Abril	60 %	34%	6%
Maio	53 %	22%	25%
Junho	53%	15%	32%
Julho	48%	22%	30%
Agosto	55%	23%	22%
Setembro	55 %	19%	26%
Outubro	68 %	27%	5%
Novembro	71 %	25%	4%
Dezembro	49%	43%	8%

Fonte: Adaptado de LABEEE (2013).

Como a maior influência do duto de luz solar, está nos pontos mais afastados da janela, a média dos valores dos dois pontos de medições mais próximos ao tubo consideraram-se neste cálculo. A seguir é apresentada a análise dos resultados das porcentagens de aproveitamento de luz natural obtida com o uso do duto de luz solar com o método PALN e as medições (Tabela 22).

Tabela 22. Percentual de Aproveitamento de luz Natural calculado para os três tipos de céu com base as medições.

Tipo de céu	Porcentagem
Céu claro	28 %
Céu semicoberto	50 %
Céu Coberto	30 %

Com base a estes percentuais calculadas por tipo de céu foi possível fazer uma estimação dos watt-hora que poderiam ser economizados ao longo do ano, para isto, foi utilizada a Frequência de Ocorrência do tipo de céu (Tabela 21). A tabela 23 mostra os resultados do percentual de aproveitamento anual e a economia em watts. Os resultados desta etapa foram resumidos para conseguir fazer o cálculo do PALN. Destaca-se que não foi calculado o PALN geral, isto é, do percentual usando a janela e o duto de luz, estes

resultados pertencem ao PALN obtido a partir do acréscimo de luz do protótipo com o difusor claro.

Não foi analisado o aproveitamento geral de luz no ambiente, para desta forma analisar o aproveitamento de luz que corresponde só ao duto de luz. Ao ser o objetivo desta etapa, conhecer a economia de energia com o sistema proposto, não foi necessário tomar o PALN geral da sala.

Conforme explicado, como iluminação mínima é considerado 300 lux, de acordo com a norma técnica Brasileira NBR 8995 (ABNT, 2013), iluminação requerida para as tarefas realizadas no ambiente analisado.

Em alguns horários a iluminância mínima já é atingida só com a janela, por isto, o PALN seria mais elevado se fosse analisado o PALN geral, analisando integralmente a iluminação fornecida pela janela e o duto de luz.

Tabela 23. Percentual de Aproveitamento de luz Natural e cálculo de economia de energia nos ambientes simulados.

MÊS	PALN	WATTS
Janeiro	40%	7200
Fevereiro	39%	7200
Março	37%	7200
Abril	37%	7200
Maio	34%	5400
Junho	32%	5400
Julho	34%	5400
Agosto	34%	5400
Setembro	33%	5400
Outubro	35%	5400
Novembro	45%	9000
Dezembro	38%	7200

A economia de energia anual calculada, a partir do aproveitamento de luz natural corresponde, à substituição do consumo equivalente a uma lâmpada de 60 watts. Foi utilizado esta equivalência só para fazer uma estimativa, deste modo a economia analisada poderia ser menor, dependendo do tipo de lâmpada a ser comparado.

O método PALN, utilizado nesta pesquisa precisa de resultados mais exatos no cálculo dos valores das iluminâncias, a análise foi calculada a partir dos horários onde a partir do uso do duto de luz, podia se prescindir da iluminação artificial. A economia de energia estimada a partir da etapa de medições varia entre 5400 a 9000 watts, dependendo do mês analisado. A Tabela 24 apresenta os valores máximos e mínimos obtidos no cálculo da estimativa do PALN e economia de energia destinada à iluminação.

Tabela 24. Valores máximos e mínimos do PALN e economia de energia calculados com base às medições.

MÊS	PALN	WATTS	Mín/Max
Junho	32%	5400	Mínimo
Novembro	45%	9000	Máximo

5.6.2 Estimativa de Payback

Com base a estes resultados foi calculado o payback, usando a fórmula do WLCC, anteriormente explicada, no capítulo 3. O fator calculado de economia de energia é um valor positivo na fórmula. Menciona-se novamente a fórmula para o melhor compreensão dos resultados:

$$NPV = \sum \Delta PV_S + R_0 - [I_{0-DL} + \sum PV_{M-DL} + \sum PV_J] \quad 15$$

Para o caso do tubo de luz, não precisa-se de uma manutenção continua, as peças que vão precisar de mais manutenção é o coletor de policarbonato e o anel de alumínio. Isto devido principalmente a estar exposto ambas as peças à intempérie. Da mesma forma foi estimado uma manutenção anual no telhado, para a peça da base, principalmente para fazer a verificação de impermeabilização do sistema.

Para o cálculo do tempo de vida útil deste sistema tomou-se em consideração os materiais. Neste caso depois de quanto tempo as peças de policarbonato começam a perder suas propriedades. Também foi considerado as peças de alumínio.

A peça de policarbonato do coletor usada nesta pesquisa, tem como dados do fabricante 10 anos de garantia, devido a que em 10 anos começa a diminuir a transmissão de luz e o material pode amarelar. O alumínio utilizado tem um tempo de vida útil de 30 à 40 anos.

Para o caso do mecanismo inferior de controle de luz sugere-se uma manutenção anual do sistema para movimentar as peças dos sistemas de controle. Com base a o anteriormente explicado, o tempo de vida útil estimado para este protótipo é de 25 anos. Observa-se os seguinte valores a serem usados para este cálculo:

Observa-se os seguintes valores a serem usados para este cálculo:

- Como ΔPV_S , que corresponde à economia anual em energia: 30 (\$) reais, cálculo efetuado no contexto atual de esta pesquisa, com os valores atuais de energia elétrica para a cidade de Curitiba.
- O valor residual (R_0) é de 50 (\$) reais, no contexto atual de pesquisa.

Os dois valores anteriormente designados pertencem aos valores positivos para efetuar o cálculo, de acordo com a fórmula 15.

- O custo do protótipo mais a instalação é de 350 (\$) reais, para o caso do protótipo sem o mecanismo de controle de luz; e 500 (\$) reais para o protótipo com o mecanismo de controle de luz.
- Da mesma forma os valor que pertence à manutenção anual é de 30 (\$) reais.

- Os valores para a substituição de peças do sistema são de 8 (\$) reais anuais, para o protótipo sem o sistema de controle de luz e 15 \$ anuais, para o protótipo com sistema de controle (incluindo valores por substituição de policarbonatos de difusor e coletor, colar do alumínio, peças de acrílico semitransparente, de acrílico opaco e peça de movimentação do sistema). Estes valores são diminuídos da soma dos valores positivos (valor residual e economia de energia).

Com base ao parâmetro de economia de energia, o cálculo do payback é estimado em 4 anos e 8 meses para o produto sem o sistema de controle do luz e 6 anos e 8 meses, para o produto com o sistema de luz. Para estes valores sempre deve-se considerar o contexto atual da pesquisa.

5.7 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o processo de configuração do protótipo do duto de luz solar, explicando as técnicas utilizadas para a confecção de cada uma das peças e componentes. Em seguida foi analisado o desempenho pós-instalação do protótipo, onde foram avaliados os dispositivos de controle de luz. Com base nos resultados, calculou-se a economia de energia e a estimativa de payback do protótipo.

Como é a configuração de um protótipo de baixo custo, e a escolha dos materiais e esteve diretamente relacionada a esta característica. Neste sentido, também deve ser considerado que foi desenvolvida a prototipagem seguindo este parâmetro.

Na fase de análise do desempenho lumínico, foi avaliado a performance do protótipo, considerando todos os componentes do duto de luz, principalmente o sistema de controle e os dispositivos de redirecionamento de luz. Estas avaliações estão conduzidas sobre condições ambientais da cidade de Curitiba. Esta análise esteve organizada considerando três tipos de céu: claro, semicoberto e coberto.

Em todas esta análise geral, deve ser considerado as condições e características da casa de teste onde está instalado o protótipo; como também a presença da janela. Realça-se que a pesar da análise ter sido realizada na estação do inverno, o protótipo e seus componentes apresentaram um desempenho considerável.

O cálculo de economia de energia, está estimado no contexto atual da pesquisa, para o setor residencial, e para a cidade de Curitiba. Resultados diferentes poderiam ser obtidos se fossem consideradas outras variáveis.

No seguinte capítulo será apresentado análise dos resultados obtidos nos capítulos 4 e 5, que correspondem a fase de simulações, prototipagem e análise pós-instalação. Com base a esta análise será atingido o objetivo da pesquisa.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E SÍNTESE DOS PARÂMETROS DE DESIGN DE DUTOS DE LUZ SOLAR

Com base nos dois capítulos anteriores, foi possível fazer uma síntese e análise para finalmente dar os parâmetros de Design para a configuração dos dutos de luz solar, estes parâmetros tem sido divididos em função dos resultados dos capítulos de simulações e análise post-instalação do protótipo. A primeira parte mostra os parâmetros baseados nos resultados do capítulo de simulação do desempenho dos dutos de luz solar e a segunda parte mostra os parâmetros com base aos resultados do capítulo de configuração e análise pós-instalação do duto de luz solar.

6.1 Parâmetros de Design com base nas simulações

As simulações efetuadas serviram para determinar a configuração do duto de luz solar, que foi posteriormente desenvolvido como protótipo na seguinte fase da pesquisa (Capítulo 5). Ao final do Capítulo 4 foram dados parâmetros para fazer a configuração do protótipo. Estes parâmetros foram novamente analisados integralmente com os resultados da fase pós-instalação, para poder determinar os parâmetros finais da simulação do desempenho dos dutos de luz solar.

Na primeira etapa da simulação foram comparados os desempenhos de 3 tubos solares com diferentes geometrias, a partir desta comparação se fez a seleção do tubo de luz mais eficiente. Este tubo de luz eleito foi simulado posteriormente com todas as variáveis de ambiente real de uso, incluindo a janela, onde posteriormente seria instalado o tubo.

6.1.1 Análise dos resultados da comparação entre os três protótipos simulados

A partir dos resultados apresentados no capítulo 4, de comparar os três protótipos propostos, foi possível determinar que o duto de luz solar de geometria reta, foi o mais eficiente. O tubo com cotovelo também apresentou um bom desempenho, principalmente em condições de céu claro e luz solar direta nos equinócios e solstício de verão.

O tubo totalmente inclinado, mostra o desempenho mais baixo. Acredita-se possivelmente por acontecer um número maior de reflexões ao interior do tubo com esta geometria. A Figura 58 mostra uma síntese dos percentuais de acréscimo obtidos com o tubo reto em comparação com o tubo totalmente inclinado, nos três tipos de céu, no solstício de inverno, verão e equinócio de outono; estes valores correspondem a diferentes horários do dia.

Como explicado no capítulo 4, o tubo 3 mostrou-se como o segundo mais eficiente, atingindo valores inclusive superiores em alguns horários em comparação com o tubo 1, principalmente, em condições de céu semicoberto e claro no solstício de verão e equinócios. Embora, estas diferenças não são tão elevadas em contraste com o tubo reto 1.

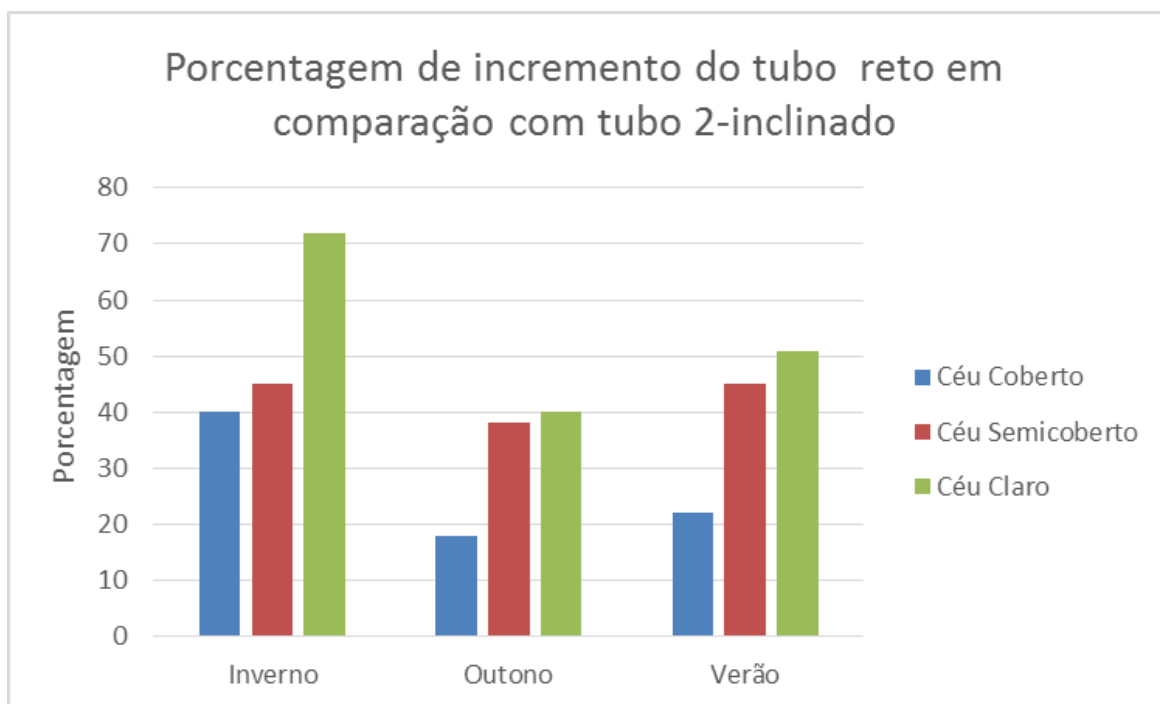


Figura 58. Resultados das simulações considerando a porcentagem de acréscimo do Tubo reto em comparação com o tubo menos eficiente para os três tipos de Céu.

Pode ser considerado no contexto específico desta pesquisa, que a simulação ajudou de forma eficiente para a previsão do desempenho do duto solar, os componentes do sistema proposto a partir das medições tiveram os resultados similares aos esperados.

Observa-se que nesta pesquisa, não foram testados os mecanismos de controle e redirecionamento de luz propostos, a partir dos resultados encontrados na fase de análise pós-instalação, evidencia-se a necessidade de testar todos estes mecanismos na simulação pré-configuração. Assim é possível determinar as características geométricas ideais nestes casos.

Todos os parâmetros a ser detalhados no Quadro 10 e Quadro 11, correspondem ao contexto desta pesquisa, sendo os parâmetros a seguir são somente referências, estas são diretrizes baseadas na simulação da análise do desempenho de protótipos de tubos de luz na fase de pré-configuração.

Na etapa de simulações, foram considerados somente as datas correspondentes às 4 estações do ano. Neste caso, foram determinadas só estas datas, com motivo de redução do tempo de análise dos resultados. Apesar de ser considerado este fato, realça-se que foi de ajuda e importância, as diferentes simulações do desempenho, na etapa de pré-configuração do produto. Destaca-se finalmente o software de simulação da iluminação, como ferramenta de apoio importante para definir a geometria do duto de luz solar.

Parâmetros com base as simulações			
Geometria do Duto de Luz Solar			
Item	Resultados dos experimentos	Alternativas encontradas na literatura	Recomendações
Tubo Reto	Geometria demonstra eficiência alta e constante em diferentes condições de céu. Mostra uma boa eficiência em dias de céu coberto.	Elevada transmissão de luz natural em localidades de alta irradiância solar, esta transmissão pode ser excessiva em determinados períodos do dia.	Pesquisar a eficiência desta geometria em condições ambientais diferentes.
Tubo com cotovelo (angulações)	Desempenho elevado em dias de luz solar direta, apresenta também um bom desempenho em condições de luz difusa.	Em localidades geográficas distantes da linha do Equador, os raios solares não entram diretamente nos dutos e por tanto não é tão necessário usar ângulos nos dutos.	Pesquisar a eficiência desta geometria em condições ambientais diferentes.
Tubo inclinado	Eficiência de Entrega de luz baixa	Tubo com ângulos de inclinação muito elevados apresentam baixa eficiência. A eficiência varia dependendo do ângulo de inclinação e as condições ambientais.	Sugere-se aumentar o diâmetro do tubo de luz ou usar um sistema de rastreamento de luz no coletor. Também, deve-se pesquisar a eficiência desta geometria em condições ambientais diferentes.
Simulação de duto de luz + janela	A simulação ajuda a ter um cálculo, embora não exato, aproximado do desempenho do duto de luz solar em diferentes datas e condições de céu, considerando ambos o sistemas.	Não se encontraram simulações realizadas considerando a luz integrada de dutos de luz solar e janelas.	Sempre devem ser considerados os outros tipos de iluminação natural presentes no ambiente, para assim poder propor modificações geométricas ou propor mecanismos de controle de luz, no duto de luz solar.

Quadro 10. Parâmetros de Design Para a previsão do desempenho do duto de luz solar – Parâmetros baseados na análise das simulações

Parâmetros com base as simulações			
Mecanismos de Controle de Luz (simulações não efetuadas nesta pesquisa)			
Item	Resultados dos experimentos	Alternativas encontradas na literatura	Recomendações
Elementos de regulação do nível de luz no difusor	Não foi simulado nenhum elemento adicional de regulação de luz no difusor, além do difusor simples.	O uso de mais de dois sistemas óticos integrados, ajudam a melhorar a eficiência de transmissão e distribuição de luz natural.	Deve ser feita a simulação de diferentes alternativas de transmitância de luz, para ter uma previsão aproximada da eficiência destes elementos.
Elementos de redirecionamento no coletor	Não foi simulado nenhum elemento de redirecionamento de luz no coletor	Não se encontraram resultados ou recomendações específicas sobre simulações de elementos de redirecionamento de luz no coletor.	Recomenda-se a simulação de diferentes sistemas de rastreamento de luz no coletor do sistema, para melhorar a eficiência do duto de luz.
Elementos de redirecionamento de luz:	Não foi simulado nenhum elemento de redirecionamento de luz na saída do difusor.	Não se encontraram resultados ou recomendações específicas sobre simulações de elementos de redirecionamento de luz na saída do difusor.	Deve ser feita a simulação do desempenho de diferentes tipos de geometrias de elementos de redirecionamento para determinar o modelo mais eficiente.

Quadro 111. Parâmetros de Design Para a previsão do desempenho do duto de luz solar – Recomendações

6.2 Parâmetros de Design com base na fase pós-instalação

6.2.1 Configuração do Duto de Luz Solar e seleção de materiais

6.2.1.1 Tubo de transporte de Luz:

Na etapa de configuração observou-se a dificuldade da construção do protótipo através do uso de dois materiais para o tubo de transporte de luz, no caso deste pesquisa, a lâmina *mylar*® e a chapa de alumínio. Recomenda-se para uma melhor facilidade de construção do protótipo a utilização de uma soa chapa de alumínio ou outro material de baixo peso que tenha num lado da folha, onde o tubo seria fechado, a parte altamente refletiva, para assim facilitar a configuração do produto. Esta alternativa é melhor que utilizar um adesivo ou lâmina refletiva sobre a chapa de alumínio.

6.2.1.2 Base do Coletor:

A base configurada para o protótipo, substituiu um módulo de telhas, neste caso a telha utilizada na casa de teste 1.0. A geometria da base vai depender e variar do tipo de telha a ser substituído. Assim, podem existir vários modelos de base do sistema; recomenda-se que esta base já sirva para substituir módulos no telhado e sejam integrados arquitetonicamente.

Também deve ser considerado a impermeabilização, este é um fator muito importante. Na instalação do protótipo, foi elaborada uma boa impermeabilização, devido principalmente às características climáticas da cidade de Curitiba, onde as chuvas são constantes ao longo do ano.

6.2.1.3 Coletor e Difusor:

Para o coletor, recomenda-se um material com tratamento eletrolítico, ou outro tipo de tratamento que facilite a manutenção e evite também a adesão de poeira e outros elementos no material. No momento da configuração, não foi considerado algum tipo de proteção ou tratamento, observou-se que na fase final da avaliação lumínica, o coletor tinha acumulado poeira, isto pode influenciar de forma negativa no desempenho lumínico do sistema.

A proteção UV foi considerada e utilizada ao momento de fazer a seleção do material de policarbonato usado para o coletor e difusor. Esta proteção deve ser considerada sempre, independentemente da escolha do material.

Pode ser usado um sistema de rastreamento de luz ao lado do coletor para otimizar a eficiência do sistema proposto, o custo do protótipo acrescentaria para este caso. No cálculo de eficiência de transmissão de luz, o máximo valor atingido foi de 60 %. Para o difusor, ao igual que com o coletor, acredita-se que com o uso de um material com maior porcentagem de transmitância a eficiência seria mais elevada. Da mesma forma recomenda-se um material com tratamento anti-riscos e de fácil manutenção.

A Tabela 25 mostra a porcentagem de transmitância ao meio dia para os três tipos de céu, foi eleito entre todos os dias registrados, os valores máximos atingidos, para às 12 horas. Observa-se a maior eficiência de transmissão para o céu semicoberto.

Tabela 25. Eficiência de transmissão de luz para os três tipos de céu.

Tipo de céu	hora	Iluminância chegando ao tubo	Iluminância saindo do duto de luz	Eficiência de Transmissão
				F: Eex/Ein
Claro	12.00	90400	31900	0.35
Semicoberto	12.00	59400	35700	0.60
Coberto	12.00	27700	12270	0.44

6.2.1.4 Sistema de Controle de luz e Dispositivos de redirecionamento de Luz:

O sistema de controle de luz que possibilita o fechamento parcial ou total da entrada de luz, proposto e utilizado nesta pesquisa mostrou uma boa eficiência no referente a melhora do desempenho do duto de luz solar.

Uma melhor alternativa de manipulação e uso do sistema de controle de luz poderia ser proposto, para o uso mais simples e prático por parte do usuário, embora a solução proposta cumpre a sua função principal; novas soluções podem ser propostas. No caso de configurar um protótipo de custo relativamente mais elevado; controles remotos tem mais praticidade. Também poderiam ser manipulados alguns dispositivos desde um sistema inteligente.

A geometria dos dispositivos de redirecionamento de luz, usados nesta pesquisa foram eleitos de forma arbitrária. Os dispositivos de redirecionamento utilizados nesta

pesquisa não foram testados na fase de simulação, recomenda-se testar estes dispositivos na etapa pré-configuração a modo de evitar a construção de vários protótipos, do mesmo modo, pode-se conhecer a melhor geometria e modelo para redirecionar a luz natural na saída do difusor.

Para a manipulação destes dispositivos, que mostraram boa eficiência, de acordo a análise dos resultados; podem ser propostas novas alternativas de manipulação deste sistema por parte do usuário, com a finalidade de favorecer a praticidade de uso.

6.2.2 Eficiência do sistema do duto solar

6.2.2.1 Sistema de Controle de luz:

Para todos os casos o difusor claro mostra um nível mais alto no desempenho do sistema, podem ser propostas outras alternativas de materiais para este sistema e assim; aumentar a eficiência de transmissão de luz natural.

De acordo com os resultados analisados com este difusor pode-se obter um aumento de até 150 % nos níveis das iluminâncias medido nas proximidades da saída do duto de luz solar; no céu coberto. Para o cálculo do PALN e economia de energia foi considerado este difusor, por apresentar o melhor aproveitamento da luz natural. Na figura 59 pode-se observar uma média efetuada, em base as medições realizadas, onde mostra-se os valores para os três casos: sem o de tubo de luz (linha azul), com o difusor claro (linha vermelha) e com o difusor de 50 % de transmitância (linha verde). Esta média pertence a todos os dias onde foram registradas as medições.

Para todos os casos é importante mencionar que esta média calculada, corresponde também aos dois pontos mais próximos ao duto de luz, por ser esta zona, como explicado no capítulo anterior, a que recebe mais influência do sistema pesquisado.

Como planejado na etapa anterior o difusor semitransparente pode ser utilizado nos casos onde precisa-se regular a iluminação, embora nos dias de céu claro e irradiação solar direta a diferencia dos valores de iluminação entre o difusor claro e semitransparente não é elevado (Figura 59).

Para os dias de céu semicoberto com menor presença de nuvens e os dias de céu claro, o difusor semitransparente de 50 % de transmitância pode reduzir o nível de luz em determinados horários, onde a iluminação natural pode causar algum tipo de desconforto, embora só em porcentagem pequena.

Para os dias de céu coberto e céu semicoberto com maior presença de nuvens, não é recomendável, para nenhum horário o uso deste difusor. Embora, em ambientes de descanso, onde não se deseja a luz natural alta, mas ainda um certo grado de iluminação, este dispositivo pode ser usado.

Como explicado na etapa anterior, não foi simulado o desempenho do difusor de 50 % de transmitância. Seria recomendável a simulação do desempenho deste elemento óptico e outras propostas de transmitância de luz.

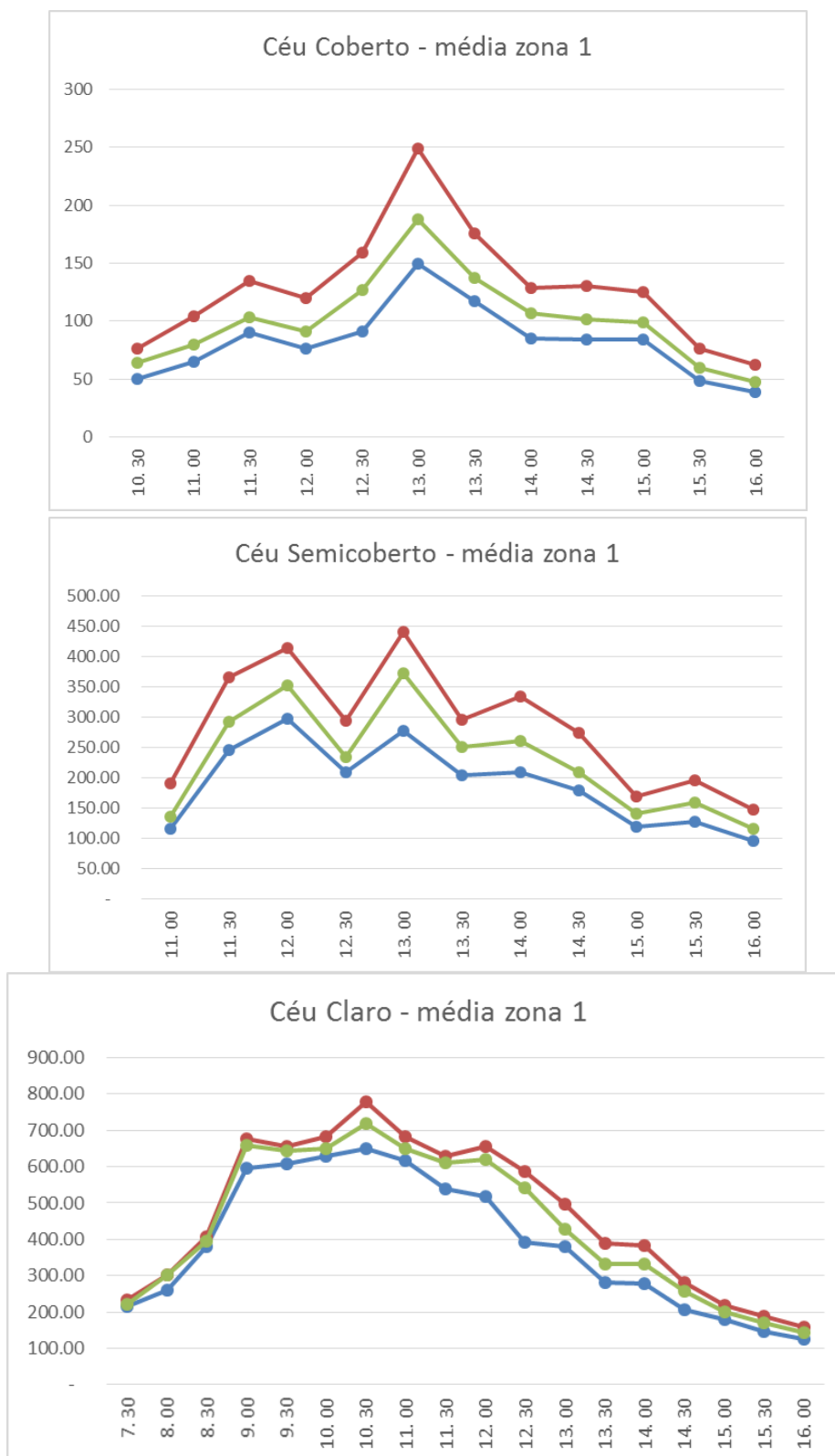


Figura 59. Média dos valores registrados nas medições para os três tipos de céu nas três situações de iluminação

6.2.2.2 Dispositivos de redirecionamento de Luz:

Os dispositivos de redirecionamento de luz cumpriram a função que foi estabelecida inicialmente: redirecionar a luz natural a planos de trabalho localizados a diferentes distâncias do difusor de luz. Esta maior eficiência corresponde ao céu claro e ao dispositivo de dimensões maiores que abrange mais área do difusor.

A Figura 60 apresenta a comparação da eficiência do dispositivo 2, de maior área para os três tipos de céu. Estes valores são os equivalentes aos máximos valores registrados para cada tipo de céu no horário apontado (12 horas). Esta comparação foi realizada para os três pontos analisados. As barras em azul, verde e laranja correspondem aos céus coberto, semicoberto e claro respectivamente.

Conseguiu-se acrescentar até 205 lux no plano de trabalho, mais próximo do duto de luz solar, usando o dispositivo 2, de todos os dias analisados, este acréscimo foi o máximo atingido (Figura 60).

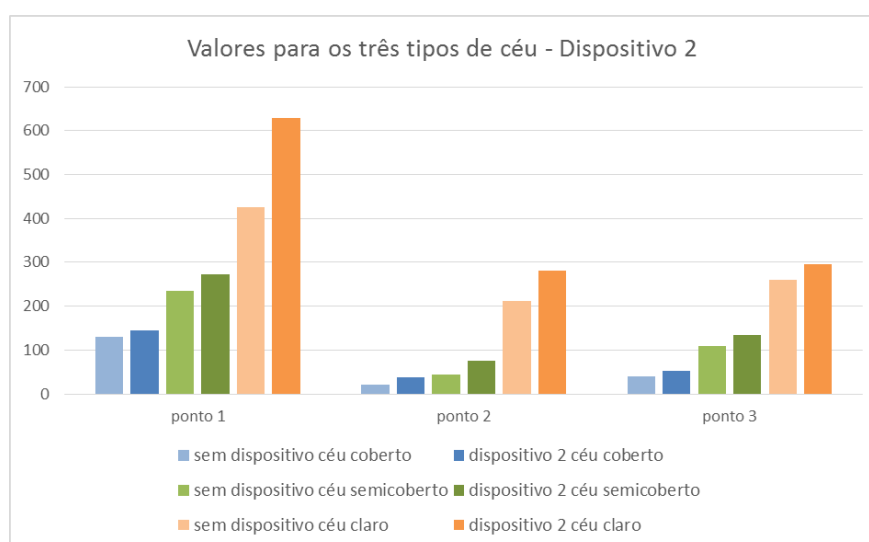


Figura 60. Valores das iluminâncias no plano de trabalho através do dispositivo 2 de redirecionamento de luz.

Uma solução, para melhorar a eficiência destes dispositivos, pode ser um sistema automático de rastreamento de luz a ser instalado no difusor, embora este sistema inicialmente não seria de baixo custo, considera-se a melhor solução para obter a máxima eficiência do sistema de redirecionamento de luz.

Na análise geral das medições é importante considerar que sempre o tubo de luz solar, com as diferentes variáveis de iluminação tem sido testado integralmente com a luz fornecida pela janela. Nos casos reais onde os dutos de luz são instalados existem outros tipos de iluminação simples nos ambientes, por isto considera-se que o tubo de luz solar analisado neste caso, ajuda a conhecer a eficiência do desempenho do tubo de luz nestes ambientes e como contribui e complementa na iluminação natural geral.

Todos os parâmetros resumidos e explicados no Quadro 12 e no Quadro 13, correspondem ao contexto desta pesquisa, são estas diretrizes analisadas com base a configuração do protótipo e principalmente à fase de pós-instalação do duto de luz solar.

Parâmetros para a configuração do protótipo			
Componentes do Tubo de luz solar			
Peça	Resultados dos experimentos	Alternativas encontradas na literatura	Recomendações
Base do coletor:	A impermeabilização é um fator muito importante a ser considerado. Número elevado de precipitações na cidade onde foram realizados os experimentos.	Recomendações de boa impermeabilização. Vários modelos podem existir, que podem variar na sua geometria dependendo do tipo de teto e telhado	Integração arquitetônica com os módulos de peças no telhado.
Coletor:	Importante considerar um material de fácil manutenção e com algum tratamento especial para evitar principalmente acúmulo de poeira. No protótipo não foi usado algum tratamento especial.	Usar um material com uma transmitância muito elevada, dar um tratamento eletrolítico ou de outro tipo para não reduzir a eficiência do sistema. A proteção UV é importante para evitar efeitos negativos da luz natural. Uso de formas simples de redirecionamento de luz natural.	Usar uma tecnologia automática de rastreamento de luz para otimizar a captação e redirecionamento de luz.
Tubo de Transporte de Luz	Não se apresentaram problemas com o material de alumínio de baixa espessura utilizado. Observaram-se problemas em utilizar dois materiais para o sistema de transporte de luz.	Utilizar um material de baixo peso próprio para evitar reforços estruturais no telhado. A refletividade interna do tubo deve ser a mais elevada possível.	Aconselha-se o uso do alumínio ou outro material com similares características. Recomenda-se uma só peça onde esteja integrado num dos lados a parte de maior refletância.
Difusor	A economia de energia deve ser calculada com o difusor, de maior transmitância, onde o percentual de aproveitamento de luz é mais elevado.	Para melhorar a eficiência deve ser de elevada porcentagem de transmissão de luz e possuir um tratamento anti-riscos.	Outros materiais, podem ser indicados, a parte do policarbonato para melhorar eficiência de transmissão de luz; como também melhorar a durabilidade da peça

Quadro 12. Parâmetros de Design para a configuração dos dutos de luz solar-componentes do protótipo.

Parâmetros para a configuração do protótipo			
Sistema de Controle de Luz			
Item	Resultados dos experimentos	Alternativas encontradas na literatura	Recomendações
Uso do Sistema de Controle de Luz	O sistema proposto pode ser usado para manipular todos os dispositivos. Não foi testado a usabilidade com usuários, por não ser o foco da pesquisa.	Manipulação com sistema de controle remoto, em produtos de custo elevado. Não foram encontradas soluções para sistemas de baixo custo.	Novas soluções para melhorar a praticidade de manipulação podem ser indicadas. Para produtos de maior custo a manipulação pode ser mediante um sistema inteligente.
Dispositivo de fechamento total de luz	Dispositivo útil nos dias de céu claro e luz direta, onde a luz fornecida pela janela é suficiente para as áreas mais distantes do ambiente, mas só em determinados horários.	Não se encontraram resultados ou recomendações específicas para este dispositivo.	Mediante um sistema inteligente, controlar os momentos onde o fechamento da entrada de luz é necessário, de acordo aos níveis de iluminação no ambiente.
Controle parcial de luz:	O difusor de 50 % de transmitância mostra-se de maior utilidade nos dias de céu claro e luz direta, e dias de céu parcialmente coberto. Pode-se regular o nível de iluminação e evitar problemas de desconforto por excesso de luz. Não recomendável para dias de céu coberto.	Não se encontraram resultados ou recomendações específicas para este dispositivo. Nos produtos atualmente comercializados não foi encontrado um sistema de regulação do nível de iluminação natural.	Recomenda-se o teste com novas transmitâncias e materiais, para melhorar a eficiência deste dispositivo. Mediante um sistema inteligente pode se regular os níveis de iluminação através da manipulação de várias peças com diferentes transmitâncias, ou propor novas alternativas; de acordo aos níveis de iluminação requeridos no ambiente.
Dispositivos de redirecionamento de luz	Eficaz nos dias de céu claro e luz direta, apresenta baixa eficiência em dias de céu coberto. Geometrias que abrangem mais área do difusor são mais eficientes. A maior porcentagem de aumento de luz se apresenta nas áreas mais próximas ao difusor.	Não se encontraram resultados ou recomendações específicas sobre dispositivos de redirecionamento de luz. Nos produtos atualmente comercializados não estão propostos estes dispositivos.	Um sistema automático de rastreamento de luz, de fácil instalação para aumentar a eficiência de redirecionamento pode ser proposto e testado. Os dispositivos também poderiam ser manipulados mediante sistemas inteligentes.
Aproveitamento de Luz Natural	O maior aproveitamento de luz corresponde aos meses de da estação de primavera e verão; e o aproveitamento de luz mais baixo aos meses da estação do inverno.	O melhor aproveitamento é para os meses de maior irradiação solar e em dias de menor número de nuvens no céu.	Utilizar os parâmetros propostos neste trabalho, como também propor novas alternativas, para aumentar a eficiência de aproveitamento de luz natural nos meses de inverno.

Quadro 13. Parâmetros de Design para a configuração dos dutos de luz solar- Sistema de Controle de Luz Natural.

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

O presente trabalho buscou apresentar os parâmetros de design para a configuração de dutos de luz solar. Estes parâmetros podem ser utilizados por designers, arquitetos, engenheiros e especialistas em iluminação, da mesma forma, estes parâmetros podem ser usados para o desenvolvimento e a perfeição destas tecnologias.

Para atingir estes objetivos, foram consideradas duas fases: A simulação do desempenho do duto de luz e a configuração e avaliação lumínica pós-instalação do protótipo. Para desenvolver estas fases, foi tomado o referencial teórico com base aos parâmetros de configuração destas tecnologias. Este referencial tem como base principal, a literatura técnica científica internacional e os parâmetros extraídos e analisados das empresas que comercializam estes produtos.

Com base na análise dos parâmetros indicados na literatura, foram realizadas simulações sobre o desempenho do duto de luz solar, em duas fases: (1) simulação de três configurações de dutos de luz solar; e (2) simulação do protótipo eleito em ambiente real de uso.

Assim mesmo, verificou-se que na etapa de simulação deveram ser testados todos os componentes do sistema proposto, incluindo o sistema de difusão de menor transmitância e os dispositivos de redirecionamento de luz, para conhecer na fase de pré-configuração o desempenho dos componentes e poder testar novas geometrias e característica ópticas a fim de fazer a melhor seleção de dispositivos que aumentam a eficiência do protótipo proposto.

A partir de ambas as etapas, de simulação e análise em ambiente real de uso foi possível determinar os parâmetros de projeto para a configuração de dutos de luz solar. Observa-se que para a identificação destes parâmetros, foi necessária a etapa de simulação e a sua contribuição foi de importância no desenvolvimento da pesquisa, porque ajudou a diminuir o tempo de análise de resultados e a comparar a eficiência das variações geométricas do duto para o desenvolvimento do produto.

A partir da análise do desempenho do duto solar na etapa de pós-instalação, obteve-se o bom desempenho lumínico atingido pelo protótipo, apesar de ser testado nas condições ambientais do inverno na cidade de Curitiba/PR. Conforme visto no Capítulo 6, as medições indicaram um incremento de até 150 % no nível de iluminação, para o céu coberto; percentual de aproveitamento de luz de até 50%, para o céu semicoberto e a eficiência de transmissão de luz máxima atingida é de 60%.

Os mecanismos de controle e redirecionamento de luz contribuem para melhorar o desempenho do protótipo, especialmente em condições de céu claro. Neste aspecto é importante mencionar que possíveis soluções para melhorar o desempenho destes componentes tem sido propostos.

O payback calculado a partir da fase de pós-instalação mostra-se ainda longo, de 4 anos à 6 anos. Deve ser considerado que este payback mostra só os benefícios econômicos

e não os benefícios intangíveis, como os benefícios que a luz natural traz ao interior dos ambientes e aos usuários.

Com esta pesquisa contribui-se não só a mostrar os benefícios deste produto, se não também a comprovar que ao ser testados e configurados estes produtos no contexto brasileiro é possível obter uma redução significativa nos custos e um retorno do investimento em menor tempo.

Neste trabalho, foram apresentadas, alternativas para otimizar o desempenho do protótipo, como o sistema de controle e redirecionamento de luz, conforme demonstrado no Capítulo 6. Estas soluções podem contribuir para o aumento do desempenho lumínico e mostram-se como uma opção adicional que aumenta os benefícios destes produtos. Esta pesquisa evidencia a importância dos dispositivos de controle e redirecionamento da luz. Como já mencionado, ainda serão necessárias novas pesquisas para aperfeiçoar o sistema.

Esta pesquisa contribui para o campo do design através da identificação e especificação de parâmetros para a configuração de dutos de luz. Esta tecnologia apresentará uma demanda ainda mais alta, no contexto atual de implementação de tecnologias que utilizem fontes renováveis, que não causem um impacto ambiental negativo.

Nesta pesquisa também é importante considerar que com a proposta realizada do sistema de controle e redirecionamento de luz; a percepção da distribuição e níveis de iluminação natural por parte do usuário será diferente e mais satisfatória; e estes níveis de luz poderão ser manipuláveis de acordo às necessidades do usuário.

Os parâmetros apresentados foram avaliados a partir de experimentos tendo sido feita a análise com base ao setor residencial. Estes parâmetros sintetizados, podem ser facilmente adaptados ao melhoramento destes produtos em outros setores de aplicação, como o comercial ou industrial; são parâmetros adaptáveis e podem servir de base para novos testes e experimentos em outros setores.

Realça-se que os parâmetros analisados e estabelecidos nesta pesquisa colaboram com a organização dos parâmetros presentes na literatura; dando sempre ênfase que estes parâmetros e recomendações estão focados no contexto brasileiro e especificamente os experimentos tem sido desenvolvidos na cidade de Curitiba.

Por razões de tempo e delimitação do escopo do trabalho, não foram testados mais modelos geométricos na fase de simulações do desempenho do produto. Também observa-se que as características da casa de teste onde foi instalado o protótipo, pode ter influenciado nos resultados do desempenho analisado na fase pós-instalação do duto de luz solar. As refletâncias dos materiais existentes na casa de teste são baixas, assim refletâncias mais elevadas teriam ajudado a aumentar o nível de luz para todos os casos analisados.

Da mesma forma as diretrizes estabelecidas nesta pesquisa, podem ser aprimoradas e podem servir de base para novos trabalhos neste campo. As recomendações para as futuras pesquisas são detalhadas no item seguinte.

7.2 Recomendações para Pesquisas Futuras

Visando contribuir para as áreas do design sustentável e, mais especificamente, para a área de sistemas de iluminação natural, são elaboradas as seguintes recomendações para futuras pesquisas:

- Uma possibilidade para continuar esta pesquisa, é fazer a avaliação do desempenho do duto de luz solar, uma vez instalado em habitações residenciais, e assim, aprofundar sobre o estudo do real impacto relacionado ao conforto lumínico e econômico nos moradores destas habitações. Neste contexto, o usuário e a sua percepção estão incluídos nas avaliações.
- Da mesma forma, de acordo a análise final e parâmetros determinados como objetivo final deste trabalho, podem ser usados e testados estes parâmetros a fim de propor o design de novos dutos de luz solar em outros contextos com condições ambientais diferentes.
- Sobre a simulação do desempenho, a possibilidade de testar diferentes geometrias e elementos ópticos na etapa de pré-configuração do protótipo apresenta-se como uma área ampla de pesquisa, já que como evidenciado a simulação foi de ajuda considerável para determinar a eficiência do protótipo proposto.
- Avaliar o impacto térmico juntamente com o impacto lumínico do protótipo, para obter uma análise mais precisa da influência ambiental desta tecnologia. Por não ser o foco desta pesquisa não foi possível realizar esta avaliação.
- Explorar novas configurações para o sistema de controle de luz e os dispositivos de redirecionamento de luz, incorporando tecnologias ativas de rastreamento de luz, assim como também melhorar o mecanismo de manipulação e controle de todos os dispositivos, para facilitar a usabilidade do produto por parte do usuário.
- Da mesma forma, para aprimorar a eficiência energética desta tecnologia, recomenda-se a integração do produto com um sistema de captação fotovoltaica para gerar o abastecimento próprio de energia para a iluminação artificial, assim, este sistema poderia ser totalmente autossuficiente e híbrido.
- Ao existir produtos no mercado com soluções similares, mas com alto custo, seria interessante desenvolver protótipos com soluções de baixo custo. Possíveis novos protótipos podem integrar à iluminação natural e artificial, o controle de iluminação por meio de sistemas digitais e de automação.

REFERÊNCIAS

ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 8995-ISSO-CIE – Iluminância de Ambientes de Trabalho**, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 15215-1:2- Iluminação natural Parte 1: Conceitos básicos e definições**, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 15215-3 – Iluminação natural Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos**, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 15215-4:2005. Iluminação natural, Parte 4: **Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição**. Rio de Janeiro, 2005.

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – **Estudo Comparativo de Tarifas, 2011**. Disponível em: <http://www.abradee.org.br/cartilha/Estudo_Comparativo_de_Tarifas_Abradee.pdf>. Acesso em: 28/08/2012.

PURIM, C. A. **Desenvolvimento de um Coletor Solar para Iluminação Direta com Fibra Óptica**. apêndice Pós- Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2008.

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. 2008. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Disponível em: Home: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/aren2008300_2.pdf>. Acesso em: 08/09/2012

AL-MARWAE, M; CARTER, D. Tubular Guidance Systems for Daylight: Achieved and Predicted Installation Performances. **Applied Energy**, v. 83, n. 7, p. 744-788. Jul. 2006.

AMMAN, J.; HOURANI, M. M.; HAMMAD, R. N. Impact of Daylight Quality on Architectural Space Dynamics: Case Study: City Mall. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3579–3585, Aug. 2012.

ARAGÃO, F. D. A. **Análise do uso da luz natural em salas de aula: estudo de caso em Aracaju - SE**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

BARONCINI, C. et al. Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission. **Solar Energy**, v. 84, n. 2, p. 296-307. Feb. 2010.

BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. Londres: James & James, 2002.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, Koen. **“Daylighting in Architecture: A European Reference Book”**. Commission of European Communities, Directorate – General XII for Science Research and Development, Londres: James&James Editors, 1993.

BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910. Dez, 2010.

BOUSSABAIN, H; KIRKHAM, R. **Whole life-cycle costing, risk and risk responses**. Blackwell; Oxford, 2004.

BRACIER – Comitê Brasileiro da CIER. **Projeto Agente Eletrobras**. Disponível em: Home: < <http://www.bracier.org.br/es/noticias/brasil/2360-projeto-agente-eletobras>>. Acesso em: 08/09/2012.

BRASIL. **Política Nacional De Resíduos Sólidos**. Edições Câmara, 2ed, Brasília, 2012.

CARLO, J.; PEREIRA, F.O.R; LAMBERT, R. Iluminação natural para redução do consumo de Energia de edificações de escritório aplicando Propostas de eficiência energética para o código de Obras do Recife. In: I Conferência latino-americana de construção sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 2004, **Anais...**São Paulo, ENTAC 2004.

CABÚS, Ricardo. C. **Análise do desempenho luminoso de sistemas de iluminação zenital em função da distribuição de iluminâncias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

CABÚS, Ricardo C. **TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações**. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005, **Anais...** Maceió, ENCAC-ELAC 2005.
CAIXA-CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Demanda Habitacional no Brasil**, Brasília: CAIXA, 2012.

CALLOW, J. **Daylighting using tubular light guide system**. (Ph. D. Tese de Doutorado). Escola de Ambiente Construído, Universidade de Nottingham; Nottingham, 2003.

CARVALHO, G. R. **Avaliação do programa Apolux segundo protocolos do Relatório cie 171:2006 referentes à iluminação natural**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CHATRON. **Tubo solar Híbrido**, 2012. Disponível em: <http://www.chatron.pt/lmgs/content/page_233/catalogo_tubosolar_hibrido_por_small.pdf. > Acesso em: 02/12/2012.

CHOI J. H.; BELTRAN L. O.; KIM H. S. **Impacts of Indoor Daylight Environments on Patient Average Length of Stay (ALOS) in a Healthcare Facility**. Building and Environment, v. 50, p. 65–75, Abr. 2012.

CIAMPINI, F. **Sistema inovadores de iluminação natural: estudo de seu desempenho sob condições de céu real**. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CIE-Commission Internationale del'Eclairage: **CIE 173:2006. Tubular daylight guidance systems**. ISBN 3 901 906 49 5, Viena, 2006.

CIE-Commission Internationale del'Eclairage: **Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky**. CIE S 011/E:2003, ISO 15469:2003(E), Viena, 2003.

CLARO, Anderson; PEREIRA, Fernando; LEDO, Rafael. **Apolux – an innovative computer code for daylight design and analysis in architecture and urbanism**. In: International IBPSA Conference, 9., 2005, Montreal. Anais eletrônicos... Montreal, 2005. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_0199_206.pdf>. Acesso em: 28/10/2012.

COPEL. **Resolução ANEEL Nº 1565, Tarifa Residencial Baixa Renda B1**, 2013. Disponível em <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Ffc28b22b01ad9182403257488005939bb>>: Acesso em: 28/07/2013.

COMFORT LUX. **iluminação Natural, Economia e Sustentabilidade**. Disponível em : <<http://www.comfortlux.ind.br/index.php>>: Acesso em: 28/07/2013

CORREIA, A. G. U. **Avaliação Pós-Ocupação da Iluminação Natural das Salas dos Setores de Aulas Teóricas da Universidade de Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Curso de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

DINONE, E.L.; PEREIRA, F.O.R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p.139- 154, out./dez. 2010.

DUBOIS, M.; BLOMSTERBERG, A. Energy Saving Potential and Strategies for Electric Lighting in Future North European, Low Energy Office Buildings: a Literature Review. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2572–2582, Oct. 2011.

DURAO JR, W. A.; WINDMOLLER, C. C. A questão do mercúrio em lâmpadas fluorescentes. **Química Nova na Escola**, v. 28, p. 15-19, 2008.

EDWARDS, L.; TORCELLINI, P. **A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants**. Technical report NREL/TP-550-30769.National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US), Jul, 2002. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/>>. Acesso em: 02/09/2012.

EFILUX. 2012. Disponível em: <<http://www.efilux.com.br/>>. Acesso em: 28/08/2012.

EIA – U.S. Energy Information Administration **Annual Energy Outlook 2011 with Projections to 2035**. Departamento de Energia, Washington, USA, 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 02/07/2012.

ELETRONBRAS/PROCEL, 2007. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil - Ano base 2005 - Classe residencial - Relatório Brasil** – Disponível em : <[http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98}&Team=¶ms=itemID={E6AA7196-E64E-4FC0-9567-994B77FB24DE}&UIPartUID={05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18}](http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98}&Team=¶ms=itemID={E6AA7196-E64E-4FC0-9567-994B77FB24DE}&UIPartUID={05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18}>)> . Acesso em 12/08/2012.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção de Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos** (2013 – 2022). 2012. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20130117_1.pdf> Acesso em: 07/01/2013.

FIEDLER, N. C.; VENTUROLI, F.; MINETTI, L. **Análise de Fatores Ambientais em Mercenarias no Distrito Federal. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000300021>. Acesso em: 02/09/2012.

FREEDMAN, A. R. **Física-Ótica e Física Moderna**, Addison Wesley, 12º Ed. São Paulo, 2010.

GALASIU A. D; VEITCH, J. A. **Occupant Preferences and Satisfaction with the Luminous Environment and Control Systems in Daylit Offices: A Literature Review. Energy and Buildings**, 38, 7, pp. 728–742, Jul. 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5º Edição. Editora Atlas, 2010.

GOUVELLO, C. **Estudo de baixo carbono para o Brasil. Banco Mundial**, Setor de Energia do Programa de Assistência à G estão, Washington, Estados Unidos, 2010.

HOPKINSON, R. G; PETHERBRIDGE, P. & LONGMORE, J. **Iluminação Natural**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1975.

HISTEST. **Quality LX1330B Digital Light Meter 200,000 Lux LCD Illuminance Meter**. . Disponível em: <<http://www.histest.com/digital-light-meter-lx1330b-200000-lux-tester.html>>. Acesso em: 28/12/2012.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Daylight in Buildings. A Source Book on Daylighting Systems and Components**. Washington, USA, 2000.

IHM, P.; NEMRI, A.; KRARTI, M. Estimation of Lighting Energy Savings from Daylighting. **Building and Environment**, v. 44, n. 3, p. 509–514, Mar. 2009.

INDAC – Instituto Nacional para o Desenvolvimento do Acrílico. **Acrílico, do começo ao fim**. 2012. Disponível em: <http://www.indac.org.br/arquivos/acrilico_indac.pdf> . Acesso em: 08/12/2012.

INTRELCAF. **Fabricação de Tubo e Perfil Especial**. 2012. Disponível em: <<http://www.intrelcaf.com.br/tuboperfil-aluminio.html>> . Acesso em: 08/12/2012.

JIN, S.O et al. Computational analysis on the enhancement of daylight penetration into dimly lit spaces: Light tube vs. fiber optic dish concentrator. **Building and Environment**, v. 59, p. 261–274, Jan. 2013.

KIM G.; KIM J. Healthy-daylighting Design for the Living Environment in Apartments in Korea. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 287–294, Feb. 2010a.

KIM G.; KIM J. Overview and New Developments in Optical Daylighting Systems for Building a Healthy Indoor Environment. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 256–269, Feb. 2010b.

KISCHKOWEIT-LOPIN, M. An Overview of Daylighting Systems. **Solar Energy**, v. 7, n. 2, p. 77-82, Aug. 2002.

KOCIFAJ, M. Efficient tubular light guide with two-component glazing with Lambertian diffuser and clear glass. **Applied Energy**, v. 86, n. 7, p. 1031-1036, 2009.

KOCIFAJ, M; DARULA, S; KITTLER, R. HOLIGILM: hollow light guide interior illumination method – an analytic calculation approach for cylindrical light-tubes. **Solar Energy**, v. 82, n.3, p. 247–259, 2008.

KOCIFAJ, M. et al, 2012. Availability of luminous flux below a bended light-pipe: Design modelling under optimal daylight conditions. **Solar Energy**, v. 86, n.9, p. 2753–2761, 2012.

KOMAR L.; DARULA, S. Determination of the Light Tube Efficiency for Selected Overcast Sky Types. **Solar Energy**, v. 86, n. 1, p. 157-163, Jan. 2012.

KRAUSE, C. B. et al. **Manual de Prédios Eficientes em Energia Elétrica**. MAIA, J. L. P. (Coord.). Rio de Janeiro: IBAM/ELETOBRÁS/PROCEL, 2002.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climático TRY de Curitiba**. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 28/02/2013

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: Editora PW, 1997.

LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: Consumo e geração de Energia**. LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2010. Disponível em: < http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_IV_WEB.pdf f>Acesso em: 28/08/2012.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001.

LEE, E. S; TAVIL, A. June 2007. Energy and Visual Comfort Performance of Electrochromic Windows with Overhangs. **Building and Environment**, 42, 6, pp. 2439–2449.

LI, D. H. W et al. An Analysis of Light-pipe System via Full-scale Measurements. **Applied Energy**, v. 87, n.1, p. 799–805, Mar. 2010.

LIGHT. Revista de eficiência energética da Light. **Luz Natural com Tecnologia Inovadora**, n, 2, ago, 2011. Disponível em: <<http://www.light.com.br/web/institucional/eficiencia/pdf/revista-eficienciaenergetica2.pdf>>. Acesso em: 28/08/2012.

LINHART, F.; WITTKOPF, S.; SCARTEZZINI, J.L. Performance of Anidolic Daylighting Systems in tropical climates – Parametric Studies for Identification of Main Influencing Factors. **Solar Energy**, v. 84, n. 7, p. 1085 –1094, Jul. 2010.

LITTLEFAIR, P. **Designing With Innovative Daylighting**. BRE, Garston, 1996.

MAŇKOVÁ, L.; HRAŠKA, J.; JANÁK, M. Simplified determination of indoor daylight illumination by light pipes. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 4, p. 22-30, 2009.

MASCARENHAS, A. C. R.; NUNES, D. Avaliação do consumo de energia após melhoria nas instalações elétricas internas e substituição de lâmpadas em habitações populares. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído: **Anais...**, 8o, Maceió: ANTAC/UFAL, 2005.

MASOSO, O. T.; GLOVER, L. J. The Dark Side of Occupants' Behaviour on Building Energy Use. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p. 173–177. Feb. 2010.

MAYHOUB, M.; CARTER D. The Costs and Benefits of Using Daylight Guidance to Light Office Buildings. **Building and Environment**, v. 46, n. 3, p. 698–710, Mar. 2011.

MAYHOUB, M.; CARTER, D. A Feasibility Study for Hybrid Lighting Systems. **Building and Environment**, v. 53, p. 83–94, Jul, 2012.

MASCARÓ, L. R. **Normas estabelecendo requisitos mínimos de habitabilidade para habitação de interesse social- sub-área Iluminação Natural**. UFRGS, Faculdade de Arquitetura, 1981.

MEDEIROS, E.N; AZAMBUJA, M. A.; ALVES, E. **Avaliação comportamental do conforto ambiental: ênfase em iluminação e ventilação natural em um conjunto habitacional de interesse social**. IN: ENTECA 2009 - VII Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura, ANAIS... MARINGÁ. ENTECA, 2009.

MESSENGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.

MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting**. Van Nostrand Reinhold Co, Nova-Iorque, 1991.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME, EPE, 2007.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2013**. Disponível em : < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf >. Acesso em: 08/07/2013.

MARCONI, M.A., LAKATOS, E.M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2003.

MOHELNIKOVA, J. Tubular Light Guide Evaluation. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2193–2200, Oct. 2009.

NABIL, A; MARDALJEVIC, J. Useful Daylight Illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905-913, 2006.

NATURALUX, 2012a. In: *Home*: <<http://www.naturalux.com.br/>>. 28/08/2012.

NATURALUX, **Loja Interativa**. 2012b. In: *Home*: <http://www.lojainterativa.com/clientes/naturalux/wpcontent/uploads/2012/04/Solatube_Naturalux-APRESENTA%C3%87%C3%83O-LIGHT.pdf>. 28/08/2012.

NICOL, F.; WILSON, M.; CHIANCARELLA, C. July 2006. Using Field Measurements of Desktop Illuminance in European Offices to Investigate its Dependence on Outdoor Conditions and its Effect on Occupant Satisfaction, and the Use of Lights and Blinds. **Energy and Buildings**, 38, 7, pp. 802–813.

PALMA, S. D. S. **Sistemas Avançados de Iluminação Natural: Estudo Comparativo de Vidros Prismáticos, Laser-Cut Panels e Channel Panels**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2009.

PARONCINI, M.; CALCAGNI, B.; CORVARO, F. Monitoring of a light-pipe system. **Solar Energy**, v. 81, n. 9, p. 1180–1186, Set. 2007.

PATTINI, A; MITCHELL, J; FERRÓN, L. Diseño de Lumiductos De Bajo Costo Para Vivienda Bioclimática Unifamiliar. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 7, n. 1, 2003.

PELEGRINI, A. V.; HARRISON, D.; SHACKLETON, J. **Splitting the Solar Spectrum for Daylighting and Water Heating Applications**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PORTUGAL SB07 SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND PRACTICES, 2007. *Proceedings...* IOP Press. pp. 451-458.

PELEGRINI, A. V. **Refractive Integrated Nonimaging Solar Collectors Design and Analysis of a Novel Solar-Daylighting-Technology**. (Ph. D. Tese de Doutorado). Escola de Engenharia e Design da Universidade de Brunel, Uxbridge, 2009.

PEREIRA, F.O.R. **Iluminação Natural no Ambiente Construído**. Gramado, RS. Curso de Iluminação no Ambiente Construído. III Encontro Nacional e I Encontro Latino – Americano de Conforto no Ambiente Construído. ANTAC, 1995.

PROFESSIONAL PLASTICS. **Folha de Dados de Mylar**. 2012. Disponível em: <<http://www.professionalplastics.com/pt/fohadedadosdemylar.html>>. Acesso em: 08/12/2012.

PICCOLO, A.; PENNISI, A.; SIMONE, F. Daylighting Performance of an Electrochromic Window in a Small Scale Test-cell. **Solar Energy**, v. 83, n. 6, p. 832–844, Jun. 2009.

PROCEL EDIFICA: **Eficiência Energética nas Edificações**. 2012. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={623FE2A5-B1B9-4017-918D-B1611B04FA2B}&Team=¶ms=itemID={C46E0FFD-BD12-4A01-97D2-587926254722}%3BLumisAdmin=1%3B&UIPartUID={D90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898}>>>. Acesso em: 01/09/2012.

RAMOS, G.; GHISI, E. 2008. Comparação de iluminâncias internas e externas obtidas por meio de simulação computacional. In: ENTAC 2008 - XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construtivo, 2008, **Anais...** Fortaleza. ENTAC, 2008.

RYER, A. **Light measurement handbook**. International light, Technical Publications Department, Newburyport, 1998.

RYCKAERT, W. R. et al. Criteria for Energy Efficient Lighting in Buildings. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 3, p. 341–347, Jul. 2010.

SAITER, G. J. **Luz Natural e Projeto de Arquitetura: Estratégias para iluminação Zenital em Centros de Compras**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Curso de Pós-graduação de arquitetura e urbanismo, universidade de Brasília, Brasília, 2005.

SHEN, H.; TZEMPELIKOS, A. Daylighting and Energy Analysis of Private Offices with Automated Interior Roller Shades. **Solar Energy**, v. 86, n. 2, p. 681–704, Feb. 2012.

SILVA, E. L; MENEZES, E.M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4 ed, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC; Florianópolis, 2005.

SOLALUX. 2012. In: *Home*: <http://solalux.com.br/mobile/?page_id=18>. 28/08/2012.

SOL-AR. **SOLAR, versão 5.0**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2012.

SOLATUBE. **Sistema de Iluminación Natural Solatube - Instrucciones de Instalación**, 2012. Disponível em: <http://www.solatube.com/common/_technical_resources/asset_upload_file663_118514.pdf>. Acesso em: 02/11/2012.

SOUZA, R. V. G. **Iluminação Natural em Edificações: Cálculo de Iluminâncias Internas - desenvolvimento de ferramenta simplificada**. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 1997.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz Natural através da utilização de Sistemas automáticos de controle para Economia de energia elétrica**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2003.

SOUZA, S. A. **Avaliação Teórica e Experimental do Desempenho de Duto de Luz, na Cidade de São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SOTO S. F. J. **Avaliação do Desempenho Luminoso de Duto de Luz: Estudo da Implementação em Ambientes Padrões de Habitações Populares em Três Latitudes**. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

SWERA. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Source Assessment. São José dos Campos: 1ª Edição, 2006.

SWERA. **Solar and Wind Energy Source Assessment**. Disponível em: <<http://maps.nrel.gov/SWERA>>. Acesso em: 01/11/2013.

TOLEDO, G. E.; BUSCH, L. E.; PELEGRINI, A.V. Tecnologias e Benefícios dos dutos solares: Uma revisão estruturada da literatura visando identificar parâmetros de projeto e contribuir para o design sustentável. in: IV simpósio paranaense de design sustentável, Curitiba, 2012, **Anais...**Curitiba, SPDS 2012.

TROPLUX. **Troplux, versão 6.014beta**. Maceió: Grillu. 2012.

TROPLUX. **Troplux – Guia do usuário**. Maceió: Grillu. 2011.

TZEMPELIKOS, A.; ATHIENITIS, A. K. The Impact of Shading Design and Control on Building Cooling and Lighting Demand. **Solar Energy**, V. 81, n. 3, p. 369–382, Mar. 2012.

VERSO, V. R. M.; PELLEGRINO, A.; SERRA, V. Light Transmission Efficiency of Daylight Guidance Systems: An Assessment Approach Based on Simulations and Measurements in a Sun/sky Simulator. **Solar Energy**, v. 85, n.11, p. 2789–2801, Nov. 2011.

WANG, C.; ABDUL-RAHMAN, H.; RAO, S. P. Daylighting can be Fluorescent: Development of a Fiber Solar Concentrator and Test for its Indoor Illumination. **Energy and Buildings**, v.42, n. 5, p. 717–727, May 2010.

WITTKOPF, S. K. Daylight Performance of Anidolic Ceiling under Different Sky Conditions. **Solar Energy**, v. 81, n. 2, p. 151–161, Feb. 2007.

WITTKOPF, S. K., YUNIARTI, E., SOON, L. K. Prediction of Energy Savings with Anidolic Integrated Ceiling Across Different Daylight Climates. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 9, p. 1120–1129, Sept. 2006.

XIFRA, M. F; EVANS, J.M. Sistemas Innovativos para el direccionamiento de luz natural películas holográficas y Lumiductos. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 6, n. 2, 2002.

YAO, J.; ZHU, N. Evaluation of Indoor Thermal Environmental, Energy and Daylighting Performance of Thermotropic Windows. **Building and Environment**, v. 49, p. 283–290, Mar. 2012.

YUN, G. Y.; KIM, H. KIM, J. T. Sustainable and Healthy Buildings: Effects of Occupancy and Lighting Use Patterns on Lighting Energy Consumption. **Energy and Buildings**, v. 46, p. 152–158, Mar. 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Comparação das medições com luxímetro com resultados do Software TROPLUX.

APÊNDICE 2: Valores das iluminâncias correspondentes aos três tipos de céu usados durante a simulação.

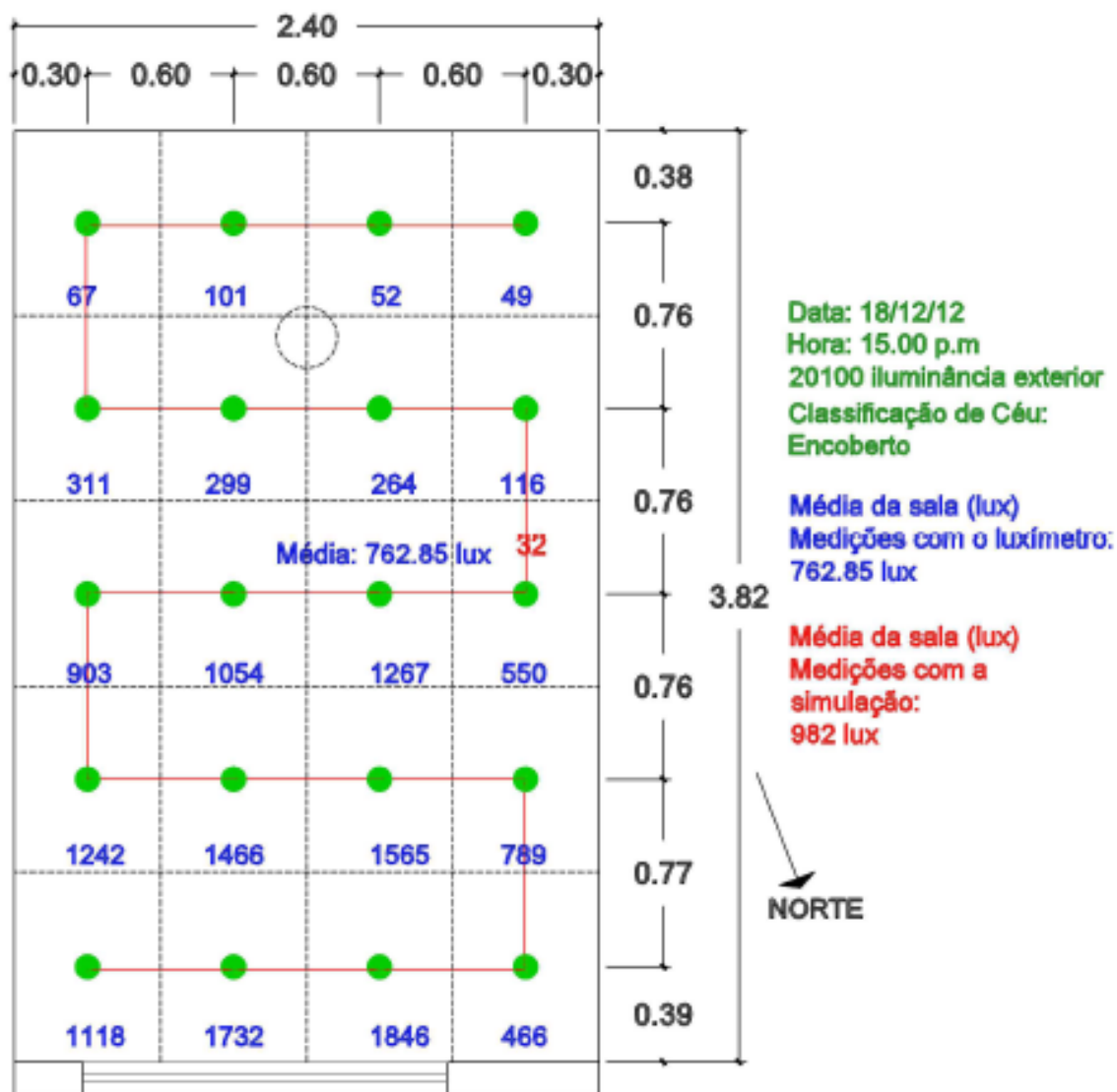
APÊNDICE 3: Isocurvas do tubo reto.

APÊNDICE 4: Valores das iluminâncias correspondentes aos três tipos de céu usados durante a simulação em ambiente real de uso – Zona 1.

APÊNDICE 5: Lista de artigos derivados da dissertação.

APÊNDICE 1

Comparação das medições com luxímetro com resultados do Software TROPLUX.



APÊNDICE 2

Valores das iluminâncias correspondentes aos três tipos de céu usados durante a simulação. Cada tabela apresenta os resultados dos três tubos solares por tipo de céu. CÉU 5 = Céu Coberto, CÉU 10 = Céu Semicoberto, CÉU 15 = Céu Claro.

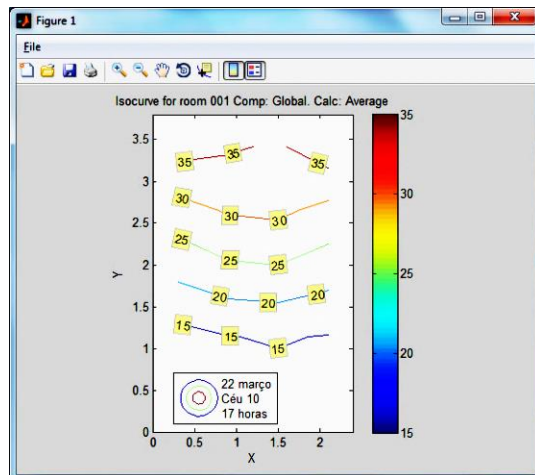
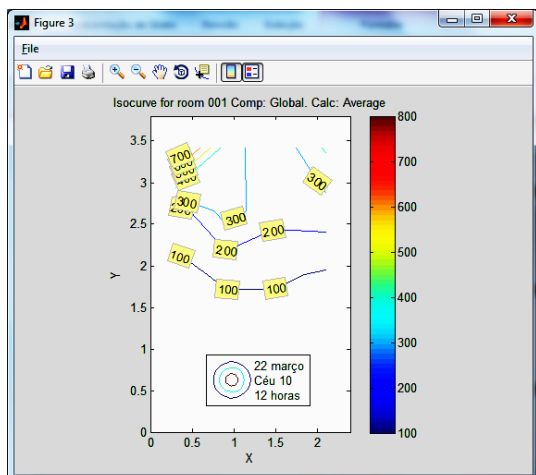
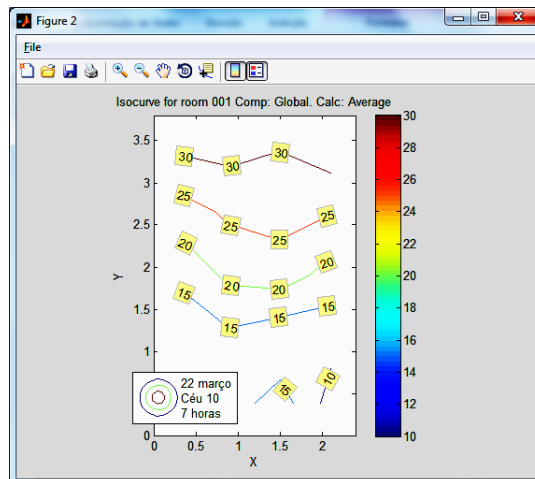
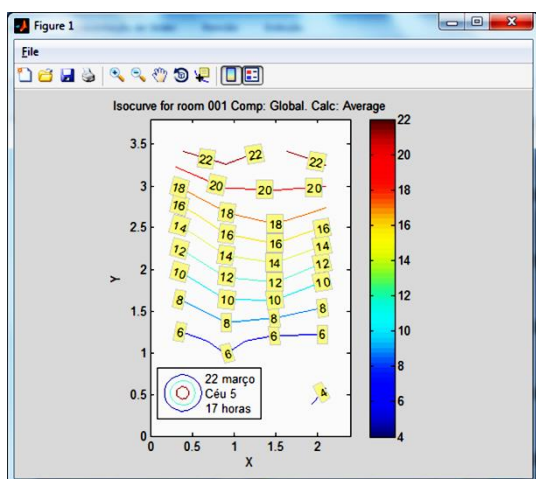
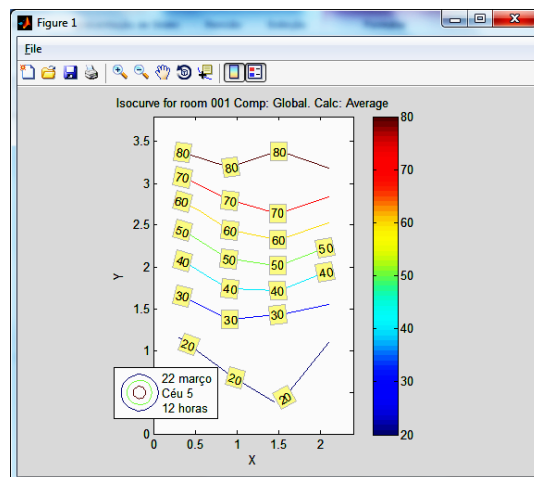
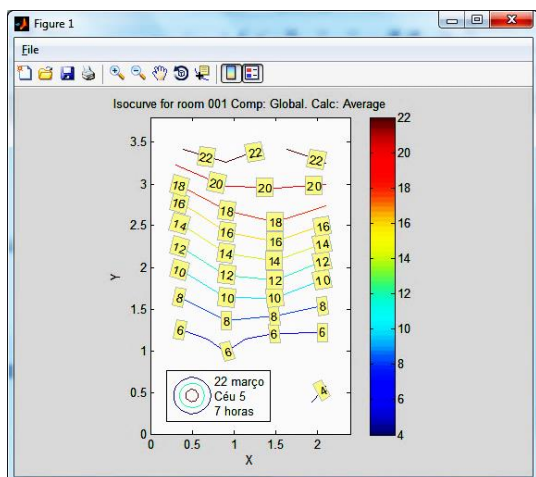
CÉU 5													
MODELO	DATA	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO 1	22/mar	12,03	22,70	31,86	38,89	43,31	44,82	43,31	38,89	31,86	22,70	12,03	31,12
	22/jun	2,84	12,63	21,04	27,49	31,54	32,92	31,54	27,49	21,04	12,63	2,84	20,36
	22/set	11,47	22,10	31,22	38,22	42,62	44,12	42,62	38,22	31,22	22,10	11,47	30,49
	22/dez	19,86	29,80	38,34	44,89	49,00	50,41	49,00	44,89	38,34	29,80	19,86	37,65
TUBO 2	22/mar	10,15	19,15	26,88	32,82	36,55	37,82	36,55	32,82	26,88	19,15	10,15	26,27
	22/jun	2,40	10,66	17,75	23,19	26,61	27,78	26,61	23,19	17,75	10,66	2,40	17,18
	22/set	10,05	19,06	26,79	32,72	36,45	37,72	36,45	32,72	26,79	19,06	10,05	26,17
	22/dez	16,50	24,76	31,86	37,30	40,72	41,89	40,72	37,30	31,86	24,76	16,50	31,29
TUBO 3	22/mar	11,42	21,55	30,25	36,92	41,12	42,55	41,12	36,92	30,25	21,55	11,42	29,55
	22/jun	2,70	11,99	19,97	26,09	29,94	31,26	29,94	26,09	19,97	11,99	2,70	19,33
	22/set	11,31	21,44	30,14	36,81	41,01	42,44	41,01	36,81	30,14	21,44	11,31	29,44
	22/dez	18,57	27,86	35,84	41,97	45,82	47,13	45,82	41,97	35,84	27,86	18,57	35,21

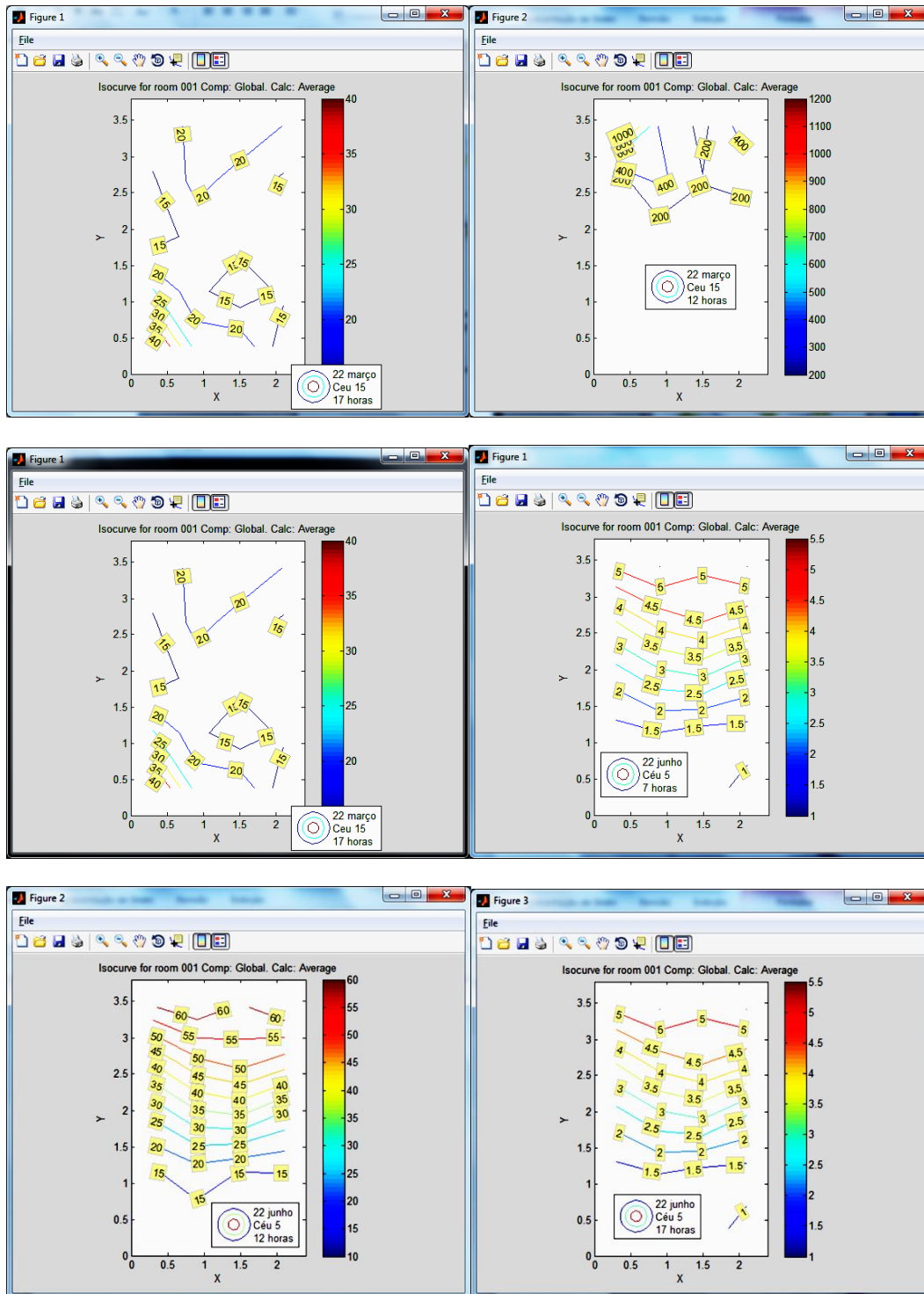
CÉU 10													
MODELO	DATA	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO 1	22/mar	20,95	59,74	140,21	218,80	283,08	196,05	293,39	162,85	85,29	52,89	22,90	139,65
	22/jun	4,20	21,79	50,35	76,24	106,04	125,50	101,33	70,96	49,48	24,17	4,64	57,70
	22/set	19,69	58,43	122,51	183,54	259,95	186,42	273,68	153,58	79,85	50,14	22,65	128,22
	22/dez	34,99	81,15	163,05	237,57	386,46	138,42	332,87	157,41	118,81	69,45	39,56	159,98
TUBO 2	22/mar	18,16	52,08	117,13	150,43	168,37	142,10	141,25	110,19	73,72	49,70	24,53	95,24
	22/jun	3,73	19,83	44,96	76,23	82,32	86,67	78,71	59,27	43,82	24,86	4,85	47,75
	22/set	17,93	51,42	115,57	148,62	166,48	140,79	140,01	109,37	73,30	49,37	24,26	94,28
	22/dez	40,44	67,98	147,00	160,28	267,63	184,19	182,85	140,75	102,35	69,40	41,10	127,63
TUBO 3	22/mar	20,34	65,05	139,13	154,15	225,31	172,86	211,42	136,73	93,11	52,69	24,27	117,73
	22/jun	4,22	22,42	51,20	73,27	90,48	107,63	93,03	72,96	47,46	25,01	4,84	53,87
	22/set	20,11	64,17	137,29	152,46	222,64	171,22	209,11	135,51	92,36	52,29	24,01	116,47
	22/dez	38,96	92,11	189,27	189,02	259,72	168,16	281,81	169,20	121,51	75,14	42,43	147,94

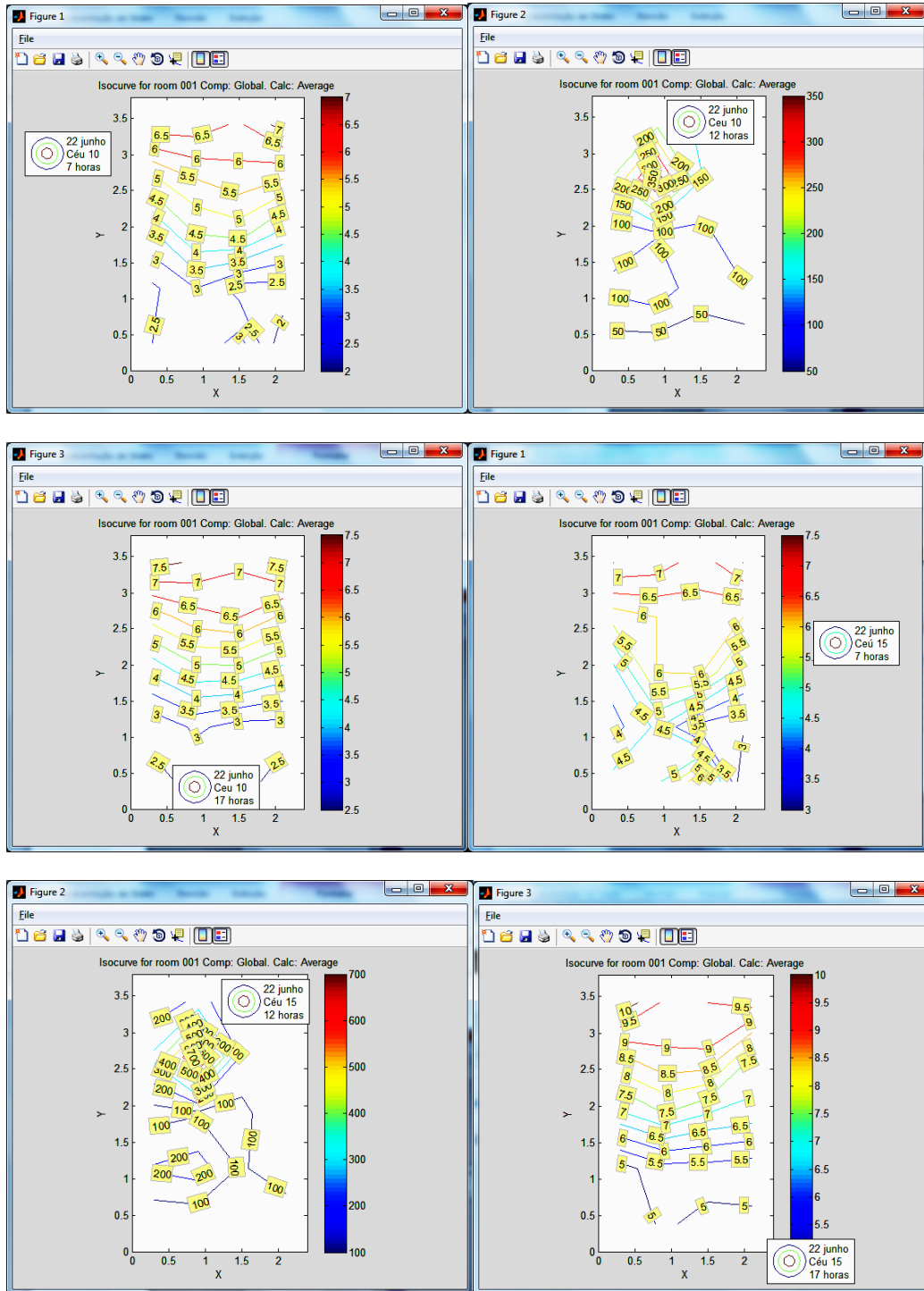
CÉU 15													
MODELO	DATA	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO 1	22/mar	19,41	96,86	197,16	293,36	379,12	211,72	394,54	181,92	60,55	40,54	19,07	172,20
	22/jun	5,17	21,52	79,24	99,24	142,18	174,34	121,83	69,45	54,07	19,48	6,96	72,13
	22/set	19,23	94,67	192,16	263,55	373,95	209,23	389,48	179,62	59,94	39,72	18,95	167,32
	22/dez	30,21	102,04	242,27	327,23	563,24	90,45	453,75	151,20	114,24	51,62	25,91	195,65
TUBO 2	22/mar	25,61	89,49	199,84	218,26	220,20	151,47	149,13	102,45	51,45	38,99	28,33	115,93
	22/jun	4,62	30,44	74,81	122,14	104,81	101,11	82,89	48,14	37,29	25,05	10,68	58,36
	22/set	27,03	118,64	225,90	280,47	254,38	175,56	152,63	106,74	55,02	40,31	30,40	133,37
	22/dez	74,52	90,47	222,83	203,15	373,61	201,89	199,14	136,19	87,69	55,69	33,87	152,64
TUBO 3	22/mar	24,37	120,67	237,34	205,91	313,48	193,16	274,25	148,96	94,40	45,15	22,86	152,78
	22/jun	5,47	30,23	86,82	100,20	108,06	136,87	106,46	79,05	45,50	22,01	8,47	66,29
	22/set	23,91	118,70	233,81	203,09	309,13	190,71	270,58	147,14	93,33	44,72	22,64	150,71
	22/dez	50,34	141,17	298,36	154,58	339,80	156,52	369,82	180,29	120,41	64,20	34,08	181,42

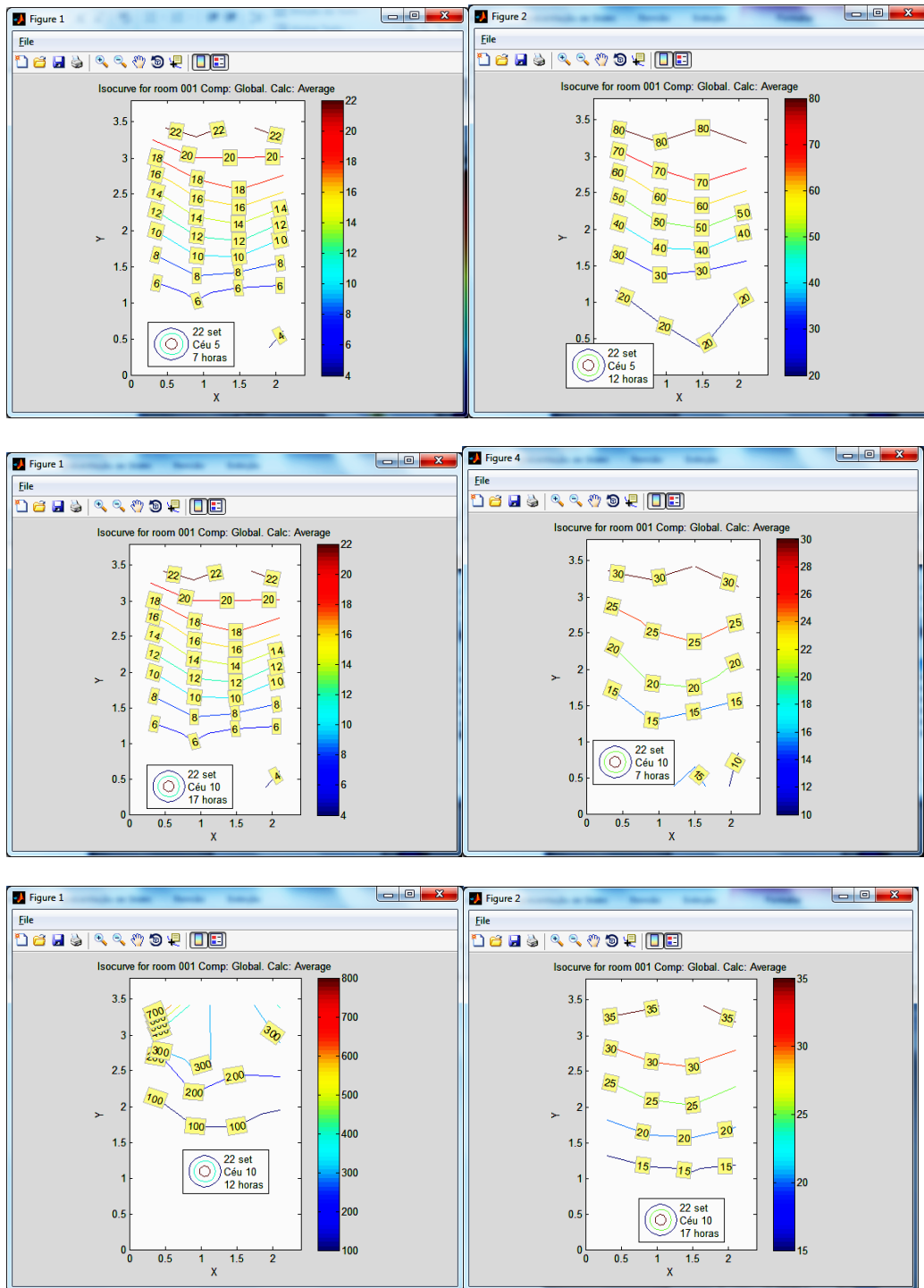
APÊNDICE 3

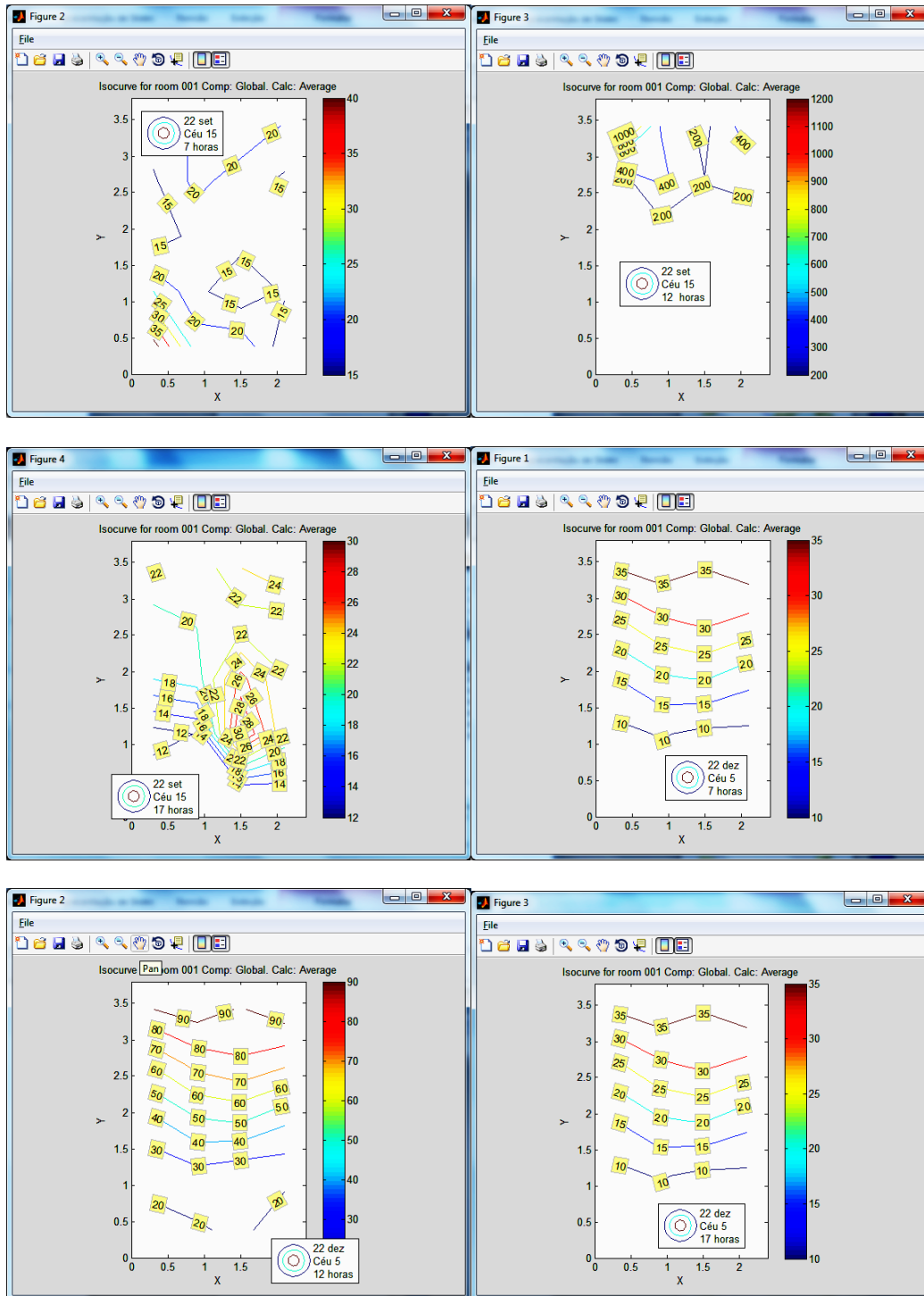
Isocurvas do tubo reto 1.

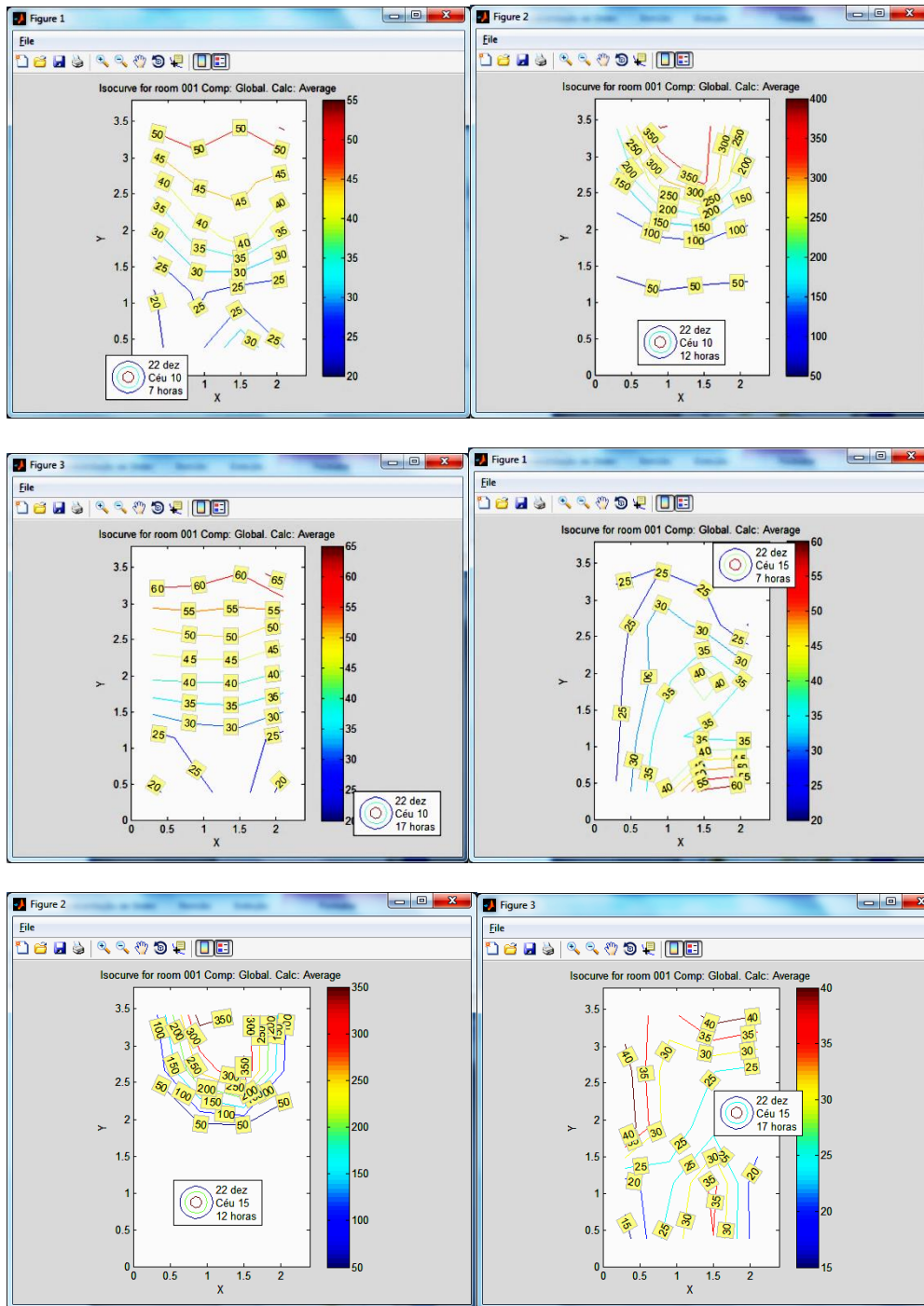












APÊNDICE 4

Valores das iluminâncias correspondentes aos três tipos de céu usados durante a simulação em ambiente real de uso – Zona 1. Os valores pertencem aos ambientes simulados com tubo de luz solar e sem tubo de luz solar para a zona 1.

CÉU 5													
MODELO	DATA	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO + JANELA	22-Março	151.36	287.81	403.98	493.12	549.16	568.27	549.16	493.12	403.98	287.81	152.52	394.57
	22-Junho	36.04	160.15	266.72	348.50	399.91	417.44	399.91	348.50	266.72	160.15	36.04	258.19
	22-Setembro	151.08	286.36	402.53	491.67	547.70	566.81	547.70	491.67	402.53	286.36	151.08	393.22
	22-Dezembro	247.98	372.12	478.71	560.51	611.93	629.47	611.93	560.51	478.71	372.12	247.98	470.18
JANELA	22-Março	134.55	253.90	356.38	435.02	484.45	501.31	484.45	435.02	356.38	253.90	134.55	348.17
	22-Junho	31.79	141.28	235.29	307.44	352.79	368.25	352.79	307.44	235.29	141.28	31.79	227.77
	22-Setembro	133.28	252.62	355.10	433.73	483.17	500.03	483.17	433.73	355.10	252.62	133.28	346.89
	22-Dezembro	218.16	327.37	421.14	493.10	538.34	553.77	538.34	493.10	421.14	327.37	218.16	413.64

CÉU 10													
MODELO	DATA	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO + JANELA	22-Março	481.72	833.00	1,021.39	1,137.55	1,180.41	1,198.27	1,305.63	1,388.84	1,401.34	1,292.28	852.55	1,099.36
	22-Junho	82.94	410.10	650.19	757.49	813.81	871.04	907.05	898.43	822.23	585.03	135.90	630.38
	22-Setembro	472.04	824.95	1,014.51	1,131.18	1,174.80	1,193.53	1,299.86	1,382.00	1,393.78	1,282.83	841.62	1,091.92
	22-Dezembro	2,238.78	1,261.11	1,244.33	1,310.07	1,338.19	1,411.07	1,539.28	1,667.13	1,761.87	1,768.86	1,536.08	1,552.43
JANELA	22-Março	441.83	736.22	857.16	912.98	900.04	922.42	1,026.82	1,144.41	1,233.27	1,191.68	812.96	925.43
	22-Junho	75.03	368.47	568.33	643.58	663.02	713.13	757.73	780.65	737.00	544.35	128.18	543.59
	22-Setembro	432.64	729.16	851.89	908.79	897.26	920.36	1,023.90	1,140.39	1,227.46	1,183.36	802.54	919.80
	22-Dezembro	2,221.69	1,109.94	1,004.18	1,010.38	987.68	1,041.90	1,183.60	1,352.13	1,520.83	1,619.08	1,463.94	1,319.58

CÉU 15													
MODELO	DATA	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	Média Dia
TUBO + JANELA	22-Março	1,772.81	1,076.92	869.04	790.07	685.09	593.71	712.68	863.02	1,045.76	1,358.22	1,534.05	1,027.40
	22-Junho	107.26	647.41	587.45	451.34	386.98	428.32	494.64	570.80	709.39	772.71	506.07	514.76
	22-Setembro	1,724.79	1,060.64	858.36	781.37	678.49	589.23	707.45	857.42	1,040.05	1,350.48	1,521.67	1,015.45
	22-Dezembro	8,271.42	1,733.76	1,080.54	915.08	772.27	752.87	855.38	1,014.60	1,246.92	1,598.11	2,033.37	1,843.12
JANELA	22-Março	1,714.63	944.12	661.81	521.64	346.33	277.79	375.09	614.96	753.17	933.08	1,473.80	783.31
	22-Junho	92.85	590.86	482.37	324.79	204.56	242.06	313.62	427.95	583.49	715.55	492.53	406.42
	22-Setembro	1,667.60	929.63	653.82	516.40	344.16	277.38	374.31	546.50	821.56	1,201.06	1,462.51	799.54
	22-Dezembro	8,455.90	1,535.18	770.80	553.64	355.66	316.52	431.27	627.42	942.69	1,412.63	1,948.37	1,577.28

CÉU 5 = Céu Coberto, CÉU 10 = Céu Semicoberto, CÉU 15 = Céu Claro.